



Diogo de Andrade Sebolão Braz Pires

Licenciado em Ciências da Engenharia

**Galgamento em estruturas de proteção
marginal face a cenários de alterações
climáticas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil- Perfil de Estruturas

Orientador: Prof.^a Dra. Maria da Graça Neves, Professor
Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e
Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa
Co-orientador: Dra. Filipa Simões de Brito Ferreira de
Oliveira

Presidente: Prof. Dr. Corneliu Cismasiu
Arguente: Prof. Dr. Luís Miguel Chagas Costa Gil



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Abril de 2018

INDICAÇÃO DE DIREITOS DE CÓPIA

“Copyright” Diogo de Andrade Sebolão Braz Pires, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Às minhas orientadoras, Professora Doutora Maria da Graça Neves e Doutora Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira. Pela motivação que sempre me deram ao longo dos últimos meses, pela dedicação, empenho e disponibilidade para me ajudar. Foram incansáveis e sem dúvida que sem o seu apoio não teria atingido este grande objetivo. O meu sincero obrigado.

À Marta Alves, a pessoa que “sofreu” e “lutou” comigo, todos os dias até à chegada da “meta”. A pessoa que levou com o meu mau feito (é mesmo muito mau) 24/7 durante todos estes meses. A pessoa que mesmo sem me compreender, estava lá, acontecesse o que acontecesse. A pessoa que sempre me fez acreditar e se tornou no meu principal pilar. A minha namorada.

Aos Pardais, aquele grupo de amigos da faculdade que fica para a vida. Sem eles a minha experiência universitária não teria sido a mesma. Pelo trabalho de equipa e entreaajuda, mesmo que as cadeiras não fossem as mesmas estávamos sempre lá uns para os outros. Pelos dias, noites e madrugadas passadas no 7, aquele edifício onde se inventaram os jogos mais caricatos que alguma vez vi, para ultrapassar a monotonia de dias e meses a fio “fechados” na faculdade.

Por fim, e como manda a regra, os últimos são sempre os primeiros. Quero agradecer às duas pessoas que me educaram. Às duas pessoas que fizeram de mim a pessoa ambiciosa que sou hoje. Esta dissertação é dedicada a vocês, pai e mãe, que sempre acreditaram em mim, não só ao longo da minha vida académica, mas também ao longo dos meus curtos 26 anos. O carácter, a personalidade e a responsabilidade que tenho hoje, devo a vocês, e um dos meus principais objetivos de vida, é fazer com que se sintam orgulhosos dia após dia. Tenho muita sorte em poder chamar-vos pais, obrigado.

RESUMO

Sendo Portugal um país com uma extensa linha de costa, as preocupações e os perigos associados às alterações climáticas aumentam de ano para ano, revelando-se necessário avaliar de que forma, as mesmas influenciam e condicionam as condições de agitação marítima a que a linha de costa e todas as estruturas inerentes estão sujeitas.

Na presente dissertação calculou-se o galgamento sobre uma estrutura de proteção marginal localizada na costa oeste portuguesa, mais concretamente na praia da Gala-Cova, a sul da Figueira da Foz, tendo em conta condições de estado do mar (agitação marítima e nível do mar) de anos transatos e condições de estado do mar afetadas pelas alterações climáticas, mais precisamente pela subida do nível médio do mar.

Foram analisados os dados de *hindcast* relativos aos parâmetros de agitação marítima do período 1952-2010 com o intuito de observar a existência de tendências, valores médios, máximos e mínimos, percebendo que tipo de informações as condições de agitação transatas nos podem fornecer relativamente as condições de agitação futuras.

Para além da análise do efeito da subida do nível médio do mar no galgamento da estrutura de proteção marginal, dada a elevada importância de outros fatores que condicionam a determinação deste fenómeno, analisou-se também a influência: i) de considerar a variabilidade do nível do mar constante ou variável, ii) do local onde são medidos os dados de agitação marítima e iii) da evolução do perfil transversal arenoso em frente à defesa aderente.

Feita a análise de resultados, concluiu-se que uma subida do nível do mar tem uma influencia clara no aumento do número de eventos em que o caudal médio galgado ultrapassa os valores limite de segurança da estrutura, registando-se aumentos anuais no número de eventos na ordem dos 2% para uma subida de 2,5mm/ano e na ordem dos 4% para uma subida de 5,0mm/ano.

Termos Chave: *Alterações climáticas, Agitação marítima, Nível do mar, Perfil transversal, Galgamento*

ABSTRACT

Since Portugal is a country with an extensive coastline, the concerns and dangers associated with climate changes increase every year. It is thus necessary to evaluate how these changes influence the wave climate and all the implemented coastal defence structures.

The present dissertation is focused on the calculation of the overtopping over a coastal dike located in the portuguese west coast, more exactly in the Gala-Cova beach, south of Figueira da Foz, taking into account the last years sea conditions (wave and sea level) and the sea conditions affected by climate changes, more precisely the rise of the mean sea level.

The hindcast wave parameters, corresponding to the period 1952-2010, were analyzed in order to identify the existence of trends, average, maximum and minimum values, and thus characterize the wave regime and the storms conditions.

Besides the analysis of the effect of the mean sea level rise in the overtopping of the coastal dike, given the high importance of other factors that determine this phenomenon, it was also analyzed the influence of: (i) the assumption of constant or variable sea level; (ii) the location of the wave data measurements; and (iii) the evolution of the sandy cross-shore profile in front of the coastal dike.

The results of the analysis allowed to conclude that the rise of the sea level has a clear influence on the increase in the number of events in which the average flow exceeds the safety limit values of the structure, with annual increases in the number of events in the order of 2% for a rise of 2.5mm/year and in the order of 4% for a rise of 5.0mm/year.

Keywords: *Climate changes, Wave climate, Sea Level, Cross-shore profile , Overtopping/*

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Objetivo do trabalho	2
1.3. Organização da dissertação	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Galgamento	5
2.1.1. Caracterização do fenómeno	5
2.1.2. Variáveis condicionantes	7
2.1.3. Valores limite de galgamento, caudal médio e volume máximo	12
2.1.4. Métodos de cálculo do galgamento	14
3. CASO DE ESTUDO	21
3.1. Zona de estudo	21
3.2. Dados de hidrodinâmica e morfologia	25
3.2.1. Agitação marítima	25
3.2.2. Nível do mar	27
3.2.3. Perfil transversal	29
4. ANÁLISE DE DADOS DE AGITAÇÃO MARÍTIMA	33
4.1. Características gerais	33
4.2. Condições de temporal	36
5. ANÁLISE DO GALGAMENTO	41
5.1. Influência do nível do mar	42
5.2. Influência da profundidade do local dos dados de agitação	49

5.3.	Influência da variação do perfil transversal	57
5.4.	Influência da subida do nível médio do mar devida às alterações climáticas.....	63
6.	CONCLUSÕES	69
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Esquema representativo do galgamento de uma estrutura (adaptado de [2]) .	5
Figura 2.2- Espraçamento da agitação marítima sobre o talude (adaptado de [4]).	6
Figura 2.3- Galgamento por “green water”, Howth, Irlanda (extraído de [3]).	6
Figura 2.4- Galgamento por salpicos (“splash”), Margate, Inglaterra (extraído de [3]).	7
Figura 2.5- Rebentação progressiva (adaptado de [4]).	9
Figura 2.6- Rebentação mergulhante (adaptado de [4]).	9
Figura 2.7- Rebentação colapsante (adaptado de [4]).	10
Figura 2.8- Rebentação de fundo (adaptado de [4]).	10
Figura 2.9- Ângulo entre a direção de propagação da agitação e a normal à estrutura.	11
Figura 2.10- Estrutura de defesa aderente e respetivos parâmetros.	12
Figura 2.11- Esquema dos parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING2 (adaptado de [3]).	16
Figura 2.12- Exemplo representativo de como se processa a informação na ferramenta de cálculo NN_OVERTOPPING	17
Figura 2.13- Esquema do declive imaginário tendo em conta a configuração da secção transversal da frente de praia e da estrutura (adaptado de [9]).	18
Figura 3.1- Concelho da Figueira da Foz, respetivas freguesias e população residente à data de 2011 [11].	21
Figura 3.2- Frente marítima da Gala Cova (© Google Earth).	24
Figura 3.3- Prolongamento do molhe norte do Porto da Figueira da Foz. Fotografias de 2006 e 2015, respetivamente à esquerda e direita (© Google Earth).	24
Figura 3.4- Estrutura de proteção marginal, praia da Gala-Cova.	25
Figura 3.5- Mapa batimétrico do norte do Oceano Atlântico da zona modelada (esquerda) bem como da zona de estudo (direita) com as respetivas boias [5].	26
Figura 3.6- Localização dos perfis topo-hidrográficos P1 a P18 e vista aérea da frente marítima da zona de estudo Gala-Cova (adaptado de [13])	30
Figura 3.7- Evolução do perfil transversal P4 da zona de estudo, Gala-Cova, entre os esporões 3 e 4 (Norte-Sul), 1975-2011.	31
Figura 3.8- Perfis aproximados para a aplicação da metodologia de cálculo do galgamento.	31
Figura 4.1- Variação da média de Hs nos meses de inverno e trimestral.	33

Figura 4.2- Desvio padrão dos dados associados à Figura 4.1	34
Figura 4.3- Valores máximos anuais e trimestrais de H_s	34
Figura 4.4- Variação da média da direção nos meses de inverno e trimestral no tempo.....	34
Figura 4.5- Desvio padrão dos dados associados à Figura 4.4.	34
Figura 4.6- Valores máximos anuais e trimestrais da direção de agitação.	35
Figura 4.7- Variação da média do período de pico nos meses de inverno e trimestral no tempo.....	35
Figura 4.8- Desvio padrão dos dados associados à Figura 4.7.....	35
Figura 4.9- Valores máximos anuais e trimestrais do período de pico.	35
Figura 4.10- Número de temporais registados entre 1953 e 2009.	36
Figura 4.11- Variação de $H_{s\text{méd}}$ nos temporais ocorridos entre 1953-2009.....	37
Figura 4.12- Duração de cada temporal registada ao longo do tempo.....	37
Figura 4.13- Número dos temporais registados em função da sua duração.	38
Figura 4.14- Variação do $H_{s\text{méd}}$ com a duração do temporal.	38
Figura 4.15- Variação da $Dir_{\text{méd}}$ com a duração do temporal.....	39
Figura 4.16- Variação do $T_{p\text{méd}}$ com a duração do temporal.	39
Figura 5.1- Condição de nível do mar em que se enquadram os maiores Q para condições de agitação marítima a -14 m ZH.....	42
Figura.5.2- QNMcte versus QNMvar para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	43
Figura 5.3- Q em função de H_s para NMcte e NMvar e para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	44
Figura 5.4- Q em função de T_p para NMcte e NMvar e para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	44
Figura 5.5- Percentagem de eventos por intervalo de diferença de Q para as diferentes condições de nível de mar e para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	45
Figura 5.6- Número de eventos por ano com $Q > 0,01$ l/s/m para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	47
Figura 5.7- Número de eventos por ano com $Q > 0,1$ l/s/m para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	47
Figura 5.8- Número de eventos por ano com $Q > 0,4$ l/s/m para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	47
Figura 5.9- Número de eventos por ano com $Q > 200,0$ l/s/m para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	48

Figura 5.10- Condição de nível de mar em que se enquadram os maiores Q para condições de agitação marítima a -37 m ZH.....	49
Figura 5.11- Número de eventos registados por intervalos de Hs.....	50
Figura 5.12- Número de eventos registados por intervalos de Dir.	51
Figura 5.13- Percentagem de eventos associados a diferentes intervalos de direções de agitação para -14 m ZH e -37 m ZH.....	51
Figura 5.14- Percentagem de dados nas diferentes gamas de direções relativas à direção perpendicular à estrutura, para -14 m ZH.	52
Figura 5.15- Q obtido através da fórmula de Mase com base em dados obtidos a -14 m ZH e a -37 m ZH.....	53
Figura 5.16- Q de galgamento para -14 m ZH versus Q de galgamento para -37 m ZH para NMvar.	54
Figura 5.17-Percentagem dos eventos associados ao respetivo intervalo de $|\Delta Q|=|Q(-14 \text{ m ZH})-Q(-37 \text{ m ZH})|$.....	54
Figura 5.18- Número de eventos por ano com $Q>0,01 \text{ l/s/m}$	55
Figura 5.19- Número de eventos por ano com $Q>0,1 \text{ l/s/m}$	56
Figura 5.20- Número de eventos por ano com $Q>0,4 \text{ l/s/m}$	56
Figura 5.21- Número de eventos por ano com $Q>200,0 \text{ l/s/m}$	56
Figura 5.22- Perfis transversais esquematizados baseados nos perfis medidos em 1975, 1978 e 2011 (PB).....	58
Figura 5.23-Q para os perfis de 1975 e 1978 em função do Q para o perfil de 2011	59
Figura 5.24- Comparação do Q obtido através da fórmula de Mase para o perfil base e para o perfil de 1975.....	59
Figura 5.25- Percentagem dos eventos associados ao respetivo intervalo de $|\Delta Q|=Q(1975)-Q(PB)$..	60
Figura 5.26- Comparação do Q obtido através da fórmula de Mase para o perfil base e para o perfil associado aos levantamentos topo-hidrográficos de 1978.	61
Figura 5.27- Diferenças entre QNMvar e QNMvar+5,0mm/ano superiores a 100% em função QNMvar	63
Figura 5.28- Diferenças entre QNMvar e QNMvar+2,5mm/ano (em cima), e QNMvar+5,0mm/ano (em baixo) superiores a 50% em função do QNMvar.	64
Figura 5.29- Diferenças entre QNMvar e QNMvar+2,5mm/ano (em cima), e QNMvar+5,0mm/ano (em baixo) superiores a 20% em função QNMvar.	64
Figura 5.30-Número de eventos em que o Q ultrapassou os valores limite de segurança da estrutura em função dos respetivos aumentos do NM, 2,5mm/ano e 5,0mm/ano.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Valores limite admissíveis de galgamento para estrutura de defesa aderente [5].	13
Tabela 2.2- Valores limite admissíveis de galgamento para pessoas e veículos [5].	14
Tabela 2.3 Valores limite admissíveis de galgamento para propriedades [5].	14
Tabela 2.4- Parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING e respectivos limites de aplicabilidade referentes a uma altura significativa de onda $H_{m0}=1,0m$.	17
Tabela 3.1- Previsões do nível do mar obtidas através do <i>WXTide32</i> e do IH.	28
Tabela 5.1- Tabela com os parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING, e os respectivos limites de aplicabilidade referentes a uma altura significativa de onda $H_{m0}=1,0m$	41
Tabela 5.2- Número de eventos por intervalo de diferença de Q (em valor absoluto) para as diferentes condições de nível de mar e para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	45
Tabela 5.3- Percentagem de eventos por QNMvar associados à respetiva diferença, $|\Delta Q|$, para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	46
Tabela 5.4- Número de eventos registados em que o Q galgado ultrapassou os valores limite de segurança admissíveis para condições de agitação marítima à -14 m ZH.	48
Tabela 5.5- Valores limites dos parâmetros de agitação marítima obtidos em -14 m ZH e em -37 m ZH.	50
Tabela 5.6- Diferença máxima entre a direção dos eventos e a direção perpendicular à estrutura para -14 m ZH.	52
Tabela 5.7- Valores limites dos parâmetros de agitação marítima obtidos em -14 m ZH e em -37 m ZH para valores de $Q>0,01$ l/s/m.	53
Tabela 5.8- Percentagem de eventos por classe de Q(-14 m ZH) e $|\Delta Q|$.	55
Tabela 5.9- Número de eventos registados em que o Q galgado ultrapassou os valores limite de segurança admissíveis para condições de agitação marítima a -14 m ZH.	57
Tabela 5.10- Diferença de caudais (valor absoluto) para os diferentes perfis e número de eventos associados ao respetivo intervalo.	60
Tabela 5.11- Relação entre a diferença entre Q(PB) e Q(1975), $|\Delta Q|$, e Q(PB).	60
Tabela 5.12- Diferença de caudais (valor absoluto) para os perfis base e de 1978 e número de eventos associados ao respetivo intervalo.	62
Tabela 5.13- Relação entre a diferença entre Q(PB) e Q(1978), $|\Delta Q|$, e Q(PB).	62
Tabela 5.14- Número de eventos em que o Q ultrapassou os valores limite de segurança admissíveis para os perfis de 1975, 1988 e perfil base.	62

Tabela 5.15- Gamas dos parâmetros de agitação associados ao aumento de galgamento devido ao aumento do NMM de 2,5 mm/ano e de 5mm/ano, com $\Delta Q > 20\%$	66
Tabela 5.16- Número de eventos em que Q ultrapassou os valores limite de segurança admissíveis para um aumento do NMM de 2,5mm/ano e 5,0mm/ano.	66
Tabela 5.17- Caudais máximos registados para NMvar, NMvar+2,5mm/ano e NMvar+5,0mm/ano e respetivas datas de ocorrência.	68

LISTA DE ABREVIATURAS

BIL	Bilbau
ECL	Esporão da Costa de Lavos
EGC	Esporões da Gala-Cova
FIG	Figueira da Foz
IH	Instituto Hidrográfico
LEI	Leixões
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDT	Modelo Digital de Terreno
NCAR	National Center of Atmospheric Research
NECP	National Center of Environmental Prediction
NM	Nível do mar
NMcte	Nível do mar constante
NMM	Nível médio do mar
NMvar	Nível do mar variável
NR	Nível de repouso
OWS	Ocean Weather Station
RNA	Rede Neuronal Artificial
SIAM	Scenarios, Impacts and Adaptation Measures
SIN	Sines
ZH	Zero Hidrográfico

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Amplitude	m
A_c	Cota da berma da estrutura de proteção	m
B	Largura da berma (submersa)	m
B_t	Largura da banquetta do pé do talude da estrutura de proteção	m
Cr	Fator de redução	m
Dir	Direção	°N
$Dir_{máx}$	Direção máxima	°N
$Dir_{méd}$	Direção média	°N
f	Frequência	s ⁻¹
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
G_c	Largura da berma da estrutura de proteção	m
H	Altura de onda	m
h	Profundidade	m
$H_{1/10}$	Média de um décimo das maiores alturas de onda	m
h_b	Profundidade da berma submersa	m
H_{m0}	Altura de onda associada ao momento de ordem 0	m
$H_{máx}$	Altura de onda máxima	m
H_s	Altura significativa de onda	m
$H_{sméd}$	Altura significativa de onda média	m
h_t	Profundidade da banquetta do pé do talude da estrutura	m
k	Número de onda	-
L	Comprimento de onda	m

L_0	Comprimento de onda ao largo	m
m_n	Momento de ordem n	m
Q	Caudal	l/s/m
Q(-14m ZH)	Caudal para a batimétrica -14 m ZH	l/s/m
Q(1975)	Caudal para o perfil 1975	l/s/m
Q(1978)	Caudal para o perfil 1978	l/s/m
Q(-37m ZH)	Caudal para a batimétrica -37m ZH	l/s/m
Q(PB)	Caudal para o perfil base	l/s/m
QNMcte	Caudal para nível de mar constante	l/s/m
QNMvar	Caudal para nível de mar variável	l/s/m
QNMvar+2,5mm/ano	Caudal para uma subida do nível do mar de 2,5mm/ano	l/s/m
QNMvar+5,0mm/ano	Caudal para uma subida do nível do mar de 5,0mm/ano	l/s/m
R2%	Nível de espraçamento excedido por 2% das ondas	m
$R_{m\acute{a}x}$	Nível de espraçamento máximo	m
R_u	Nível de espraçamento	m
s	Declividade da onda	-
S_η	Densidade espectral	m ² /s
t	Tempo	s
T	Período da onda	s
$T_{H1/10}$	Período de onda associado à média de 1/10 das maiores alturas de onda	s
$T_{Hm\acute{a}x}$	Período máximo	s
T_m	Período médio	s
$T_{m-1,0}$	Período médio em frente à estrutura de proteção	s
T_p	Período de pico	<u>s</u>

$T_{p_{m\acute{a}x}}$	Período de pico máximo	s
$T_{p_{m\acute{e}d}}$	Período de pico médio	s
T_s	Período significativo	s
x	Distância	m
α	Ângulo do talude com a horizontal	°
α_B	Ângulo da berma submersa do talude	°
α_d	Ângulo do talude submerso	°
α_u	Ângulo da estrutura acima da berma	°
β	Ângulo de incidência da agitação	°
γ_f	Coeficiente de redução devido à rugosidade/permeabilidade do manto	°
δ	Fase inicial	m
Δf	Largura da banda de frequências	s ⁻¹
ε	Largura espectral	-
η	Superfície livre do mar	-
ξ	Número de Iribarren	-
ω	Frequência angular	rad/s

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

As alterações climáticas assumem-se, na atualidade, como um grande motivo de preocupação, dado os impactos previstos para o futuro próximo sobre os sectores fundamentais do tecido económico e social de diversos países. No caso específico de Portugal, a preocupação relativa às alterações climáticas aumenta dada a sua extensa linha de costa, com cerca de 950km de comprimento, que alberga aproximadamente 75% população e é onde se situam os grandes ativos económicos, sociais e ambientais do país.

As consequências mais relevantes das alterações climáticas no litoral de Portugal Continental são, segundo Andrade et al. [1], o aumento do nível médio do mar e a alteração do regime de agitação marítima, sendo que os litorais menos vulneráveis serão aqueles compostos por arribas e promontórios rochosos e os mais afetados serão as arribas talhadas em materiais brandos, praias arenosas, restingas e zonas húmidas associadas.

Os estudos realizados no âmbito nacional (Projeto SIAM e SIAM II) sobre a evolução do litoral de Portugal Continental durante o século XX e a previsão das consequências das alterações climáticas no litoral no horizonte de 2100 indicam que o nível médio do mar apresenta um comportamento transgressivo caracterizado por uma tendência de elevação determinada principalmente pela expansão térmica do oceano. O aumento relativo do nível do mar no nosso país tem-se vindo a alterar nos últimos 200 anos. Entre 1882 e meados dos anos 90 verificou-se uma subida do nível do mar de aproximadamente 1,5mm/ano contrastando com a década de 2000, durante a qual se verificou um agravamento de 1mm/ano, registando-se assim uma subida do nível do mar de 2,5mm/ano. No âmbito do consenso existente no meio científico sobre o aumento do nível do mar e sobre o facto desse aumento se agravar na segunda metade do século XXI, alguns autores [1] julgam prudente adotar, para o horizonte temporal de 2100, um cenário de posicionamento do nível médio global dos oceanos de 1m acima do atual, resultando num aumento anual de 1,0mm/ano aproximadamente.

Relativamente ao regime de agitação marítima que afeta Portugal, o mesmo é muito influenciado pela ondulação NW proveniente do norte do Atlântico e é caracterizada por ondas com elevada potência que provocam, de acordo com o projeto SIAM, a deriva litoral de sedimentos, dirigida para sul no caso da costa oeste, e dirigida para este no caso da costa sul. Este estudo prevê, nos finais do século XXI, uma rotação média no sentido horário da direção de propagação da agitação marítima com valor da ordem de 5° a 10°. Prevê ainda que a principal consequência desta alteração seja o agravamento do processo erosivo da linha de costa principalmente nas zonas constituídas por arribas brandas e por sistemas dunares.

De acordo com os resultados dos estudos SIAM I e SIAM II [1], os impactos mais relevantes sobre a linha de costa de Portugal Continental consequentes da variação do nível do mar são: o aumento das cotas de inundação da superfície costeira inundável bem como da população e bens em risco, acompanhada pelo reajuste dos ecossistemas ribeirinhos; o aumento da influência marinha nos estuários e lagunas acompanhado por uma modificação do regime de marés e eventualmente do balanço sedimentar. Estima-se ainda que o número de pessoas em risco direto de inundação aumente de um fator de 20 para 150 vezes (relativamente ao ano de referência 1995) e uma perda acumulada de território num cenário extremo de elevação do nível do mar de 0,7% [1].

Dada a importância do assunto, na presente dissertação é estudada a influência das alterações climáticas previstas para Portugal no caudal de galgamento sobre as estruturas de proteção marginal aderentes existentes na costa da Gala-Cova, Figueira da Foz. Concretamente, avaliou-se a influência da subida no nível do mar, pelo facto de ser uma variável que afeta de forma direta o caudal de galgamento. Já as alterações associadas à rotação prevista para direção média do regime de agitação marítima não foram tidas em conta pois, embora seja um fator que afeta o caudal de galgamento em estruturas de proteção marginal, não o faz de forma direta e o seu grande impacto é no agravamento da erosão sobre a linha de costa, fugindo desta forma ao objetivo principal da dissertação. Os valores adotados para a subida do nível do mar nas análises efetuadas são 2,5mm/ano, considerando um cenário otimista, e 5,0mm/ano, considerando um cenário mais gravoso, ainda que não tanto como o apresentado por alguns autores [1].

1.2. Objetivo do trabalho

Na presente dissertação pretende-se analisar o galgamento sobre uma estrutura de proteção marginal localizada na costa oeste portuguesa, mais concretamente na praia da Gala-Cova, a sul da Figueira da Foz, tendo em conta condições de estado do mar (agitação marítima e nível do mar) de anos transatos e condições de estado do mar afetadas pelas alterações climáticas, mais precisamente pela subida do nível médio do mar.

Para além da análise do efeito da subida do nível médio do mar no galgamento da estrutura de proteção marginal, dada a elevada importância de outros fatores que condicionam a determinação deste fenómeno, analisou-se também: i) a influência de considerar a variabilidade do nível do mar devida às marés astronómica e meteorológica, ii) a influência da profundidade onde são considerados os dados de agitação marítima em frente à estrutura e iii) a influência da evolução do perfil transversal arenoso em frente à defesa aderente.

De modo a efetuar as análises acima referidas utilizaram-se dados de agitação marítima entre 1953-2009, que foram igualmente analisados.

1.3. Organização da dissertação

Neste capítulo de introdução, faz-se um enquadramento geral sobre o tema e expõem-se os objetivos e a forma como a dissertação se encontra organizada. A mesma está dividida em 6 capítulos, no início dos quais é feita uma pequena introdução às respetivas matérias neles compreendidas.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica necessária para a compreensão da dissertação e do tema em estudo, isto é, são fornecidas as bases teóricas do fenómeno de galgamento, mais concretamente como se caracteriza o fenómeno, quais as variáveis condicionantes e quais os valores limite de segurança. São ainda apresentados alguns métodos de cálculo para a obtenção do galgamento numa estrutura de proteção marginal.

No capítulo 3, é feito o enquadramento geográfico e demográfico da zona de estudo, e são apresentados e explicados os dados usados nas análises efetuadas nos dois capítulos seguintes, mais concretamente, são apresentados os dados relativos à agitação marítima, nível de mar e morfologia do perfil transversal da zona em estudo.

No capítulo 4 é feita a análise dos dados relativos à agitação marítima local e ainda a análise dos temporais ocorridos nos anos em apreço. São analisadas as tendências evolutivas dos parâmetros de caracterização da agitação, bem como identificados valores máximos, mínimos e médias.

No capítulo 5 é feita a análise ao galgamento em função dos parâmetros que influenciam o fenómeno, nomeadamente: o nível do mar, que foi considerado constante e variável; a profundidade à qual se obtiveram os dados de agitação, que foi considerada -14 m (ZH) e -37 m (ZH); e a alteração da morfologia, especificamente do perfil arenoso em frente à estrutura, sendo que foram considerados 3 perfis distintos com base nos levantamentos topo-hidrográficos dos anos de 1975, 1978 e 2011. Por último, analisou-se a influência do aumento do nível médio do mar previsto para a zona de estudo consequente das alterações climáticas, tendo por base dois cenários: um aumento de 2,5mm/ano e um aumento de 5,0mm/ano.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões relativas às análises efetuadas na dissertação e são apresentadas sugestões relativas a trabalho futuro.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Galgamento

2.1.1. Caracterização do fenómeno

O galgamento é um fenómeno determinante no dimensionamento de estruturas de proteção marginal, que são construídas com os objetivos de travar o recuo da linha de costa e evitar a inundação em frentes marítimas edificadas. Estas estruturas também são frequentemente designadas por defesa marítima longitudinal aderente.

Em Portugal continental, como já foi referido anteriormente, dada a grande extensão da sua costa (950Km), a grande densidade populacional e a intensa atividade que nela coabitam é necessário tomar precauções no que respeita ao galgamento que ocorre devido às condições de agitação marítima e níveis de mar, influenciadas pelas alterações climáticas. A segurança da população que habita perto da linha de costa bem como das atividades económicas e de todas as estruturas publicas e privadas, de habitação, comércio ou empresariais localizadas na costa, depende em grande parte das estruturas marítimas que as protegem.

O galgamento pode ser quantificado através do caudal médio, Q , em l/s por metro de desenvolvimento da estrutura na direção longitudinal, que passa sobre a cota de coroamento da estrutura. As variáveis a ter em conta, por influenciarem de forma direta o galgamento são: as condições da agitação marítima incidente na estrutura (altura de onda, período e direção), a geometria do talude, em particular os declives do talude da estrutura e a cota de coroamento da estrutura, Figura 2.1 e o declive da face de praia. Consoante o valor das variáveis apresentadas, é possível obter o galgamento, importante para quantificar o respetivo risco.

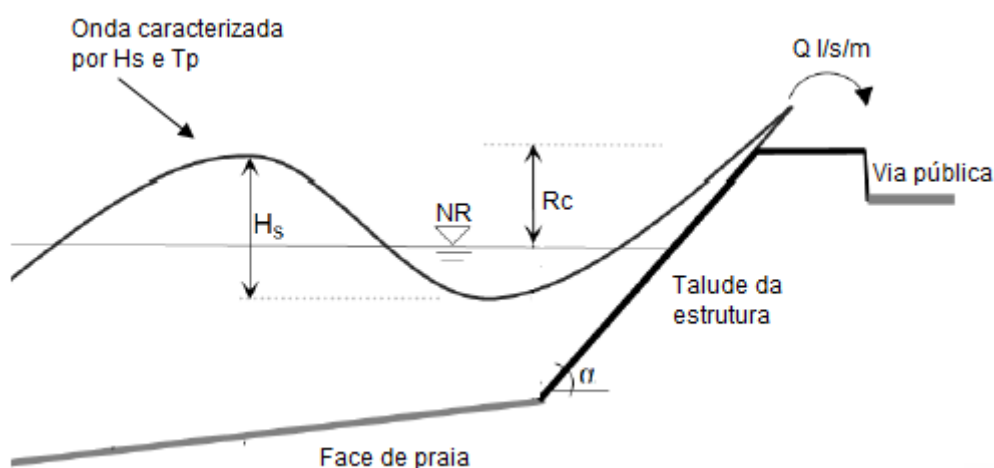


Figura 2.1- Esquema representativo do galgamento de uma estrutura (adaptado de [2]) .

Dependendo das condições marítimas, o nível máximo atingido por uma onda ao entrar em contacto com a estrutura marítima localizada a uma profundidade h , medida na vertical, tendo por referência o nível do mar em repouso, R_u , é que vai definir que tipo de galgamento ocorre (Figura 2.2). A este fenómeno dá-se o nome de espraçamento, ou como é conhecido na literatura Anglo-Saxónica “*run-up*” [3].

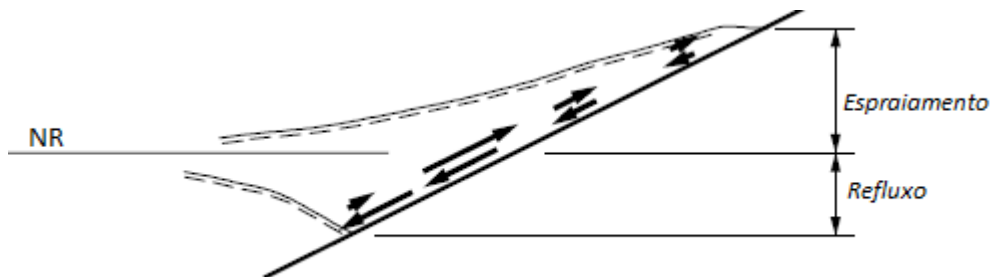


Figura 2.2- Espraçamento da agitação marítima sobre o talude (adaptado de [4]).

Se o espraçamento exceder a cota de coroamento da estrutura através de uma lâmina contínua de água, estamos na presença de um galgamento significativo designado por “green water” (Figura 2.3). Se o espraçamento se mantiver abaixo da cota de coroamento da estrutura, não ocorrerá galgamento significativo, sendo que o único fenómeno possível de se verificar será a presença de alguns borrifos (“*spray*”) sobre a zona protegida, projetados pela ação do vento. A última forma de galgamento que pode acontecer é no caso da onda rebentar sobre a face da estrutura e, neste caso particular, verificar-se-á um volume considerável de salpicos (“*splash*”), Figura 2.4, sobre a zona protegida [3].



Figura 2.3- Galgamento por “green water”, Howth, Irlanda (extraído de [3]).



Figura 2.4- Galgamento por salpicos ("splash"), Margate, Inglaterra (extraído de [3]).

2.1.2. Variáveis condicionantes

No projeto de estruturas longitudinais aderentes é importante calcular o galgamento esperado, tendo em conta que a variação do nível do mar, a agitação marítima e a geometria da estrutura, condicionam o comportamento da estrutura face às suas exigências.

Nível de mar

A previsão do nível do mar é extremamente importante para a previsão do impacto do galgamento na zona protegida por uma estrutura de defesa, e é determinante na definição da sua cota de coroamento.

No projeto de estruturas, que tem como objetivo ser de longa duração após a fase de projeto e construção, deve ser tido em conta o possível aumento do nível do mar. Uma estrutura de defesa com uma geometria complexa, construída para mitigar inundações sobre uma localidade não é fácil de modificar ou substituir. Em tal situação, é aconselhável que o seu projeto se realize considerando um aumento do nível do mar previsto para os próximos 50 a 100 anos.

As forças motrizes básicas das marés são astronómicas, o que permite uma previsão precisa dos seus níveis. Em grande parte do mundo, as maiores flutuações no nível da água são causadas por marés astronómicas causadas pela rotação relativa do sol e da lua em volta da Terra todos os dias. Os efeitos gravitacionais sobre a superfície dos oceanos causam marés com períodos bem definidos, principalmente semi-diurnos e diurnos, sendo que as marés semi-diurnas tendem a ser significativamente maiores que as diurnas. Além das marés resultantes da rotação da Terra, outras periodicidades são evidentes na flutuação dos níveis de maré, sendo a mais óbvia o ciclo lunar.

De um modo geral, a diferença entre o nível da maré astronómica medida e a maré prevista é bastante pequena (ou seja, de alguns centímetros). Na prática, essa diferença não é significativa quando comparada com as diferenças entre os níveis de maré previstos e os níveis de mar observados, que incluem os efeitos climáticos. Efetivamente, os níveis extremamente elevados do nível do mar são causados por uma combinação de níveis elevados de maré associadas a efeitos barométricos

causados por uma variação na pressão atmosférica e ventos fortes que podem causar, em alguns casos, um aumento notável no nível do mar em poucas horas. Estas elevações do nível de de mar são designadas como sobrelevações meteorológicas e são causadas por baixas pressões atmosféricas.

Agitação marítima

Outro fator condicionante para o galgamento é a agitação marítima, caracterizada pelos parâmetros já apresentados na secção 2.1., altura de onda, período e direção.

O galgamento é bastante influenciado pela profundidade a que se encontra a estrutura. Em grandes profundidades o comprimento de onda, L_0 , designado como comprimento de onda ao largo é calculado com base no período, de pico, T_p , ou médio, T_m (Equações 2.11 e 2.13). À medida que a profundidade diminui e se aproxima de pequenas profundidades, a declividade da onda, s_0 (Equações 2.12 e 2.14), calculada com a altura de onda significativa, H_{m0} , e com o comprimento de onda ao largo, L_0 , aumenta. Como resultado, a velocidade de propagação, C , diminui. Quando a onda interage com a estrutura, já em profundidades pequenas, a energia incidente pode ser dissipada através dos fenómenos de rebentação e percolação. A energia que não é dissipada pelos fenómenos acima mencionados é refletida ou transmitida através da transposição da massa de água sobre as estruturas de proteção marginal- galgamento [3].

$$L_{om} = \frac{gT_m^2}{2\pi} \quad (2.1)$$

$$s_{om} = \frac{H_{m0}}{L_{om}} \quad (2.2)$$

$$L_{op} = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (2.3)$$

$$s_{op} = \frac{H_{m0}}{L_{op}} \quad (2.4)$$

em que:

g - aceleração da gravidade;

L_{om} - comprimento de onda ao largo, calculado com o período médio, T_m ;

L_{op} - comprimento de onda ao largo, calculado com o período de pico, T_p ;

s_{om} - declividade da onda calculada com L_{om} ;

s_{op} - declividade da onda calculada com L_{op} ;

A forma como a onda rebenta ao entrar em contacto com a estrutura de defesa também influencia o galgamento. A forma como a onda rebenta sobre a estrutura pode ser caracterizada pelo número de Iribarren, ξ_o , que relaciona o declive do talude, $\tan \alpha$, com a declividade da onda:

$$\xi_{om} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{S_{om}}} \quad (2.5)$$

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{S_{op}}} \quad (2.6)$$

em que:

ξ_{om} - número de Iribarren calculado com S_{om} ;

ξ_{op} - número de Iribarren calculado com S_{op} ;

α - ângulo de talude da estrutura com a horizontal.

Para $\xi < 0,5$, a rebentação da onda é progressiva (*spilling*), isto é, a crista deforma-se e torna-se instável, criando uma espuma suave sobre o talude. Este tipo de rebentação verifica-se com maior frequência em zonas com declive suave, Figura 2.5 [3].

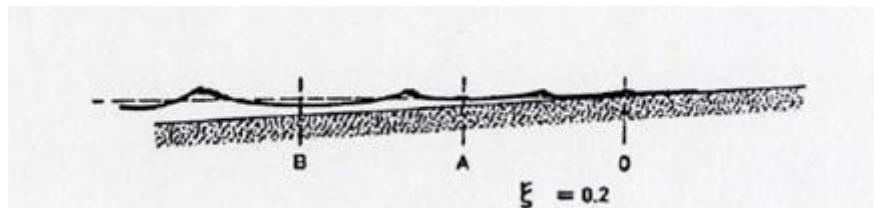


Figura 2.5- Rebentação progressiva (adaptado de [4]).

Para $0,5 < \xi < 3$, a onda rebenta de forma súbita, a crista cria uma curvatura e cai sobre o talude da estrutura originando grandes salpicos. Neste caso a rebentação diz-se mergulhante (*plunging*), Figura 2.6 [3].



Figura 2.6- Rebentação mergulhante (adaptado de [4]).

A sobreposição entre os dois tipos de rebentação referidos anteriormente, ocorre quando $3 < \xi < 3,5$. Neste caso, a crista não rebenta por completo, não existem grandes salpicos, mas cria-se uma espuma que se estende pelo talude. Este tipo de rebentação diz-se colapsante, Figura 2.7 [3].

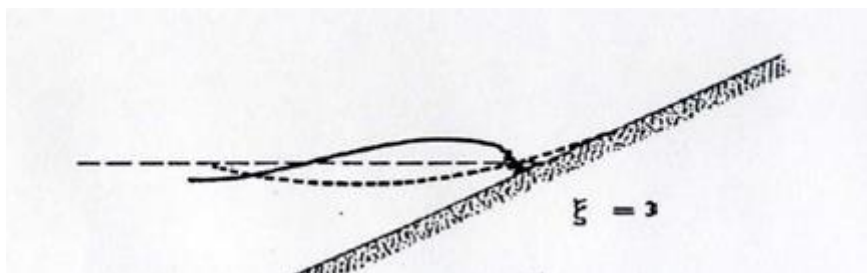


Figura 2.7- Rebentação colapsante (adaptado de [4]).

Quando a onda apresenta uma baixa declividade, ou seja, quando estamos na presença de um número de Iribarren elevado ($\xi > 3,5$), esta deforma-se e espraia sobre o talude sem rebentar, sendo então denominada como rebentação de fundo, Figura 2.8 [3].

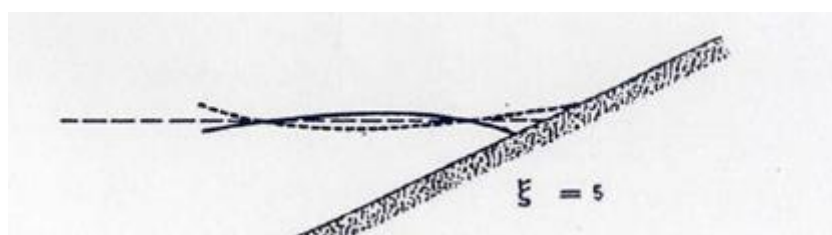


Figura 2.8- Rebentação de fundo (adaptado de [4]).

O galgamento é fortemente influenciado pelo ângulo entre a direção de propagação das ondas e a direção perpendicular à estrutura de defesa, β , Figura 2.9. Ou seja, às ondas com incidência normal à estrutura corresponde um valor de $\beta = 0^\circ$. Grande parte das formulações empíricas existentes foram desenvolvidas para $\beta = 0^\circ$, que consideram como cenário mais gravoso, não tendo assim em conta a direção da agitação.

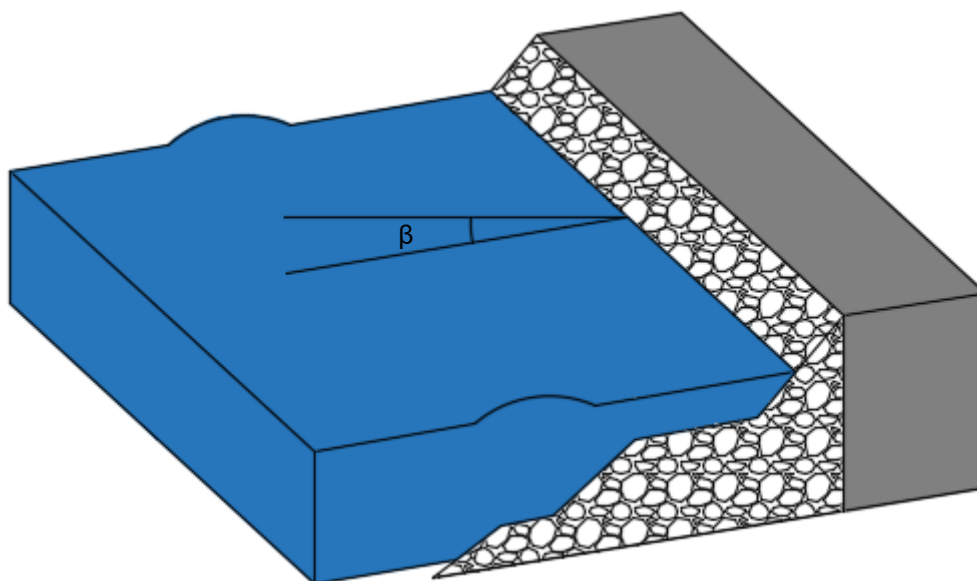


Figura 2.9- Ângulo entre a direção de propagação da agitação e a normal à estrutura.

Como o homem não tem como controlar as variáveis dependentes da natureza, mas apenas as consegue prever numa curta janela de tempo, é através da geometria da estrutura que é possível “controlar” (reduzir) o galgamento, dimensionando a estrutura para os respectivos caudais de galgamento admissíveis ou, em caso de urgência, perigo inesperado ou calamidade, intervir alertando a população com sistemas de alerta eficazes e testados.

Geometria da estrutura

O ideal para reduzir os riscos de galgamento seria dimensionar as estruturas com elevadas cotas de coroamento. No entanto, esta solução requer mais mão de obra, mais material e mais tempo, e os custos adicionais inerentes a este panorama, o impacto estético a nível visual das obras de grandes dimensões, em alguns casos inapropriadas para a funcionalidade respetiva, e a zonas ambiente e turisticamente sensíveis onde se inserem as obras pode comprometer a sua viabilidade.

Na Figura 2.10 apresenta-se um esquema de uma estrutura de defesa aderente com o pé do talude acima do nível do mar e os principais parâmetros geométricos. Tal como já foi referido, um parâmetro relevante para o galgamento é R_c , a diferença entre a cota de coroamento e o nível de repouso, NR , pois quanto maior for esse valor, menor será a probabilidade de haver galgamento.

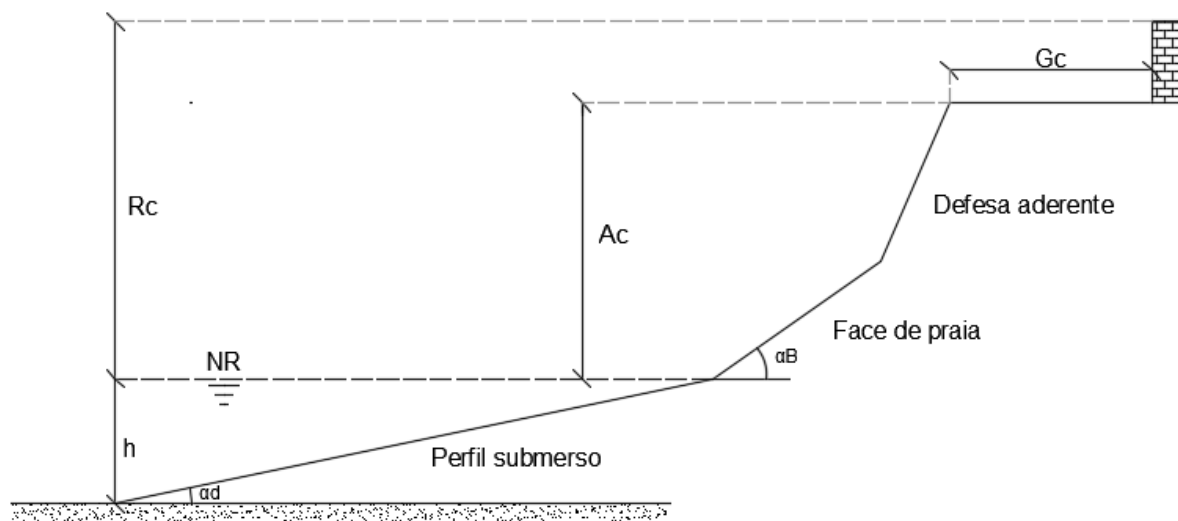


Figura 2.10- Estrutura de defesa aderente e respectivos parâmetros.

Na Figura 2.10, os parâmetros que definem a estrutura são:

- A_c - distância entre o nível de repouso e a berma da estrutura;
- G_c - largura da berma da estrutura;
- h - profundidade em frente à estrutura;
- NR - nível de repouso;
- R_c - distância entre a cota de coroamento da estrutura e o nível de repouso;
- α_d - ângulo de talude (submerso).
- α_B - ângulo de talude (face de praia).

O galgamento, para além de poder ser reduzido através de alterações da geometria da estrutura, tais como com a subida da cota de coroamento, pode também ser reduzido através da dissipação de energia das ondas devida à rugosidade e permeabilidade dos materiais que compõem o talude da estrutura ou devida ao efeito de uma eventual berma de coroamento da estrutura, Figura 2.10. O declive do talude também é uma variável relacionada com a geometria da estrutura condicionante do galgamento já que influencia, entre outros, a forma como a onda rebenta sobre esta.

2.1.3. Valores limite de galgamento, caudal médio e volume máximo

As defesas aderentes são dimensionadas e construídas com o objetivo principal de limitar o galgamento que de outra forma poderia causar inundações costeiras. Os valores de galgamento tolerados são específicos do local em análise, pois o volume de água que se permite que galgue a estrutura dependerá do tamanho e da utilidade da área envolvente protegida, da extensão e magnitude das valas de drenagem, caso existam, e do período de retorno.

Os principais perigos do galgamento de estruturas de defesa marítima nas suas áreas envolventes são os danos a pessoas e bens. Na grande maioria dos casos, pode-se analisar o galgamento e as suas consequências em quatro categorias gerais [3]:

- Danos na estrutura de defesa tanto a curto prazo como a longo prazo com a possibilidade de reincidência de inundações;
- Danos à propriedade e infraestruturas na área protegida, incluindo perda de recursos económicos e ambientais;
- Risco direto de lesões ou morte de pessoas imediatamente atrás da defesa sejam elas pedestres ou passageiros de qualquer outro tipo de transporte;
- Inundações de baixa profundidade (inconveniente, mas sem perigo).

Para as categorias anteriormente descritas, são apresentados nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6 os valores limite de caudais médios de galgamento para estruturas de defesa aderente proposta pela U.S.Army Corps of Engineers [5], de acordo com a função da estrutura e o nível de estragos associados.

Tabela 2.1- Valores limite admissíveis de galgamento para estrutura de defesa aderente [5].

Condições e tipo de danos	Caudal médio q (l/s por m)
Sem danos se o coroamento e o tardoiz estiverem bem protegidos	50-200
Sem danos no coroamento e no tardoiz de um dique de argila coberto por relva	1-10
Sem danos no coroamento e no tardoiz mesmo se não estiverem protegidos	0,1
Danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da defesa frontal	200
Danos em zonas de circulação relvadas ou levemente protegidas	50

Tabela 2.2- Valores limite admissíveis de galgamento para pessoas e veículos [5].

Condições e tipo de danos	Caudal médio q (l/s por m)
Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com perceção de que se pode molhar, galgamento gera escoamento de pouca altura, sem jactos de água a cair, perigo reduzido de queda para o mar	1,0-10,0
Pessoas cientes, com visão clara do mar, que não ficam facilmente perturbadas ou assustadas, capazes de tolerar o facto de ficarem molhadas, que se deslocam numa zona larga	0,1
Circulação a baixa velocidade, galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jactos de água a cair na via, veículo não imerso	[10-50]
Circulação a velocidade moderada ou alta, galgamento projectado com grande velocidade ou com jatos de água a cair na via que podem imergir o veículo	0,01-0,05

Tabela 2.3 Valores limite admissíveis de galgamento para propriedades [5].

Condições e tipo de danos	Caudal médio q (l/s por m)
Danos significativos ou afundamentos de grandes navios	50
Afundamento de navios pequenos localizados a 5-10m da estrutura	10
Danos em grandes navios	10
Danos em edifícios	1
Danos em equipamento localizado a 5-10m da estrutura	0,4

2.1.4. Métodos de cálculo do galgamento

A complexidade do fenómeno do galgamento torna difícil a sua determinação devido às várias variáveis que o condicionam.

O caudal médio galgado sobre estruturas de proteção marginal pode ser determinado através de diagramas de projecto ([6], [7]) ou através de várias fórmulas ([3], [8]), sendo necessário analisar o local onde os parâmetros de agitação marítima, que afetam a estrutura, são considerados. Desta forma, os locais mais comuns onde os parâmetros de agitação utilizados no cálculo do galgamento são medidos, são: i) ao largo; ii) na base do talude da face de praia; e iii) na base do talude da estrutura de proteção. Contudo quando a estrutura é construída em águas de muito pouca profundidade, ou em terra, torna-se difícil estimar a altura de onda na base do talude da estrutura. Para preencher essa lacuna na literatura, Mase et al., 2013 [9] propôs uma fórmula de cálculo do espraio e do galgamento de uma estrutura de proteção marginal construída em terra, usando as características da agitação medidas em grandes profundidades, e recentemente estendida a profundidades intermédias.

Assim, para estruturas de proteção que se encontrem em terra, os dois métodos disponíveis na literatura para calcular o galgamento são: ferramenta NN_OVERTOPPING ([3], [10]), método baseado em Redes Neurais Artificiais e a fórmula de Mase [9].

NN_OVERTOPPING

A ferramenta NN_OVERTOPPING foi desenvolvida pela DELFT HYDRAULICS. O estudo no qual esta ferramenta se baseou foi co-patrocinado pela Comissão das Comunidades Europeias no âmbito do projeto CLASH (“Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard *analysis on permissible wave overtopping*”), onde se abordou a problemática da modelação e previsão do galgamento numa vasta gama de estruturas marítimas, em protótipo e em laboratório [10].

Esta ferramenta computacional funciona à base de Redes Neurais Artificiais. As Redes Neurais Artificiais (RNA) são parte integrante do campo da inteligência artificial, e nesse contexto, podem ser definidas como sistemas que simulam a inteligência tentando reproduzir a estrutura dos cérebros humanos. Revelam também uma extraordinária capacidade para executar de uma forma rápida e eficiente tarefas de grande complexidade, tais como o processamento da informação, memória associativa e a capacidade para classificar e generalizar conceitos.

As RNAs são organizadas sob a forma de camadas e dentro de cada camada há um ou mais elementos de processamento chamados “neurónios”. A primeira camada é a camada de entrada e o número de neurónios nesta camada é igual ao número de parâmetros de entrada. Os parâmetros de entrada do NN_OVERTOPPING e os seus limites de validade são apresentados na Figura 2.12 e na Tabela 2.4 onde:

- H_{m0} [m]: Altura de onda significativa em frente à estrutura, calculada com o momento de ordem zero do espectro, m_0 ;

- $T_{m-1,0}$ [s]: Período médio em frente à estrutura, calculado com os momentos espectrais m_{-1} e m_0 . Por vezes este parâmetro não é conhecido, podendo relacionar-se com o período de pico, T_p , através da expressão $T_{m-1,0} = T_p/1.1$
- β [°]: Ângulo entre a direção de propagação da agitação e a direção normal à estrutura.
- h [m]: Profundidade em frente à estrutura, mais precisamente, a altura de água imediatamente a montante da estrutura e onde se dá a rebentação;
- h_t [m], B_t [m]: Profundidade e largura da banquetta do pé do talude da estrutura. Se não existir banquetta, h_t e B_t são iguais a zero;
- B [m], h_b [m], $\tan \alpha_B$ [-]: parâmetros que descrevem a berma da estrutura: largura medida horizontalmente; profundidade na berma, medida no centro desta; e inclinação da berma. Se a berma estiver acima do nível de água, h_b é negativo. Se a berma for horizontal, $\tan \alpha_B$ é igual a zero;
- R_c [m], A_c [m], G_c [m]: parâmetros que descrevem a parte superior da estrutura: distância entre o nível de repouso e a cota de coroamento da estrutura, medida verticalmente do nível da água ao ponto mais alto impermeável da estrutura; distância entre o nível de repouso e a berma de coroamento da parte permeável da estrutura; e largura da berma de coroamento;
- $\cot \alpha_d$ [-], $\cot \alpha_u$ [-]: declives da estrutura abaixo e acima da berma, respetivamente;
- γ_f [-]: coeficiente de redução do galgamento devido à rugosidade/permeabilidade da estrutura.

A última camada é a camada de saída e o número de neurónios nesta camada é igual ao número de parâmetros de saída (“*outputs*”). As camadas entre as camadas de entrada e saída são as camadas ocultas e consistem em uma série de neurónios a serem definidos na configuração da RNA (Figura 2.12). Cada neurónio em cada camada recebe informações da camada anterior através das conexões, realiza algumas operações padrão e produz uma saída [3]. As saídas previstas do NN_OVERTOPPING, são os valores do caudal médio de galgamento, q , os intervalos de confiança associados e o caudal esperado no protótipo, i.e., o valor de q corrigido tendo em conta alguns efeitos de escala e de modelo.

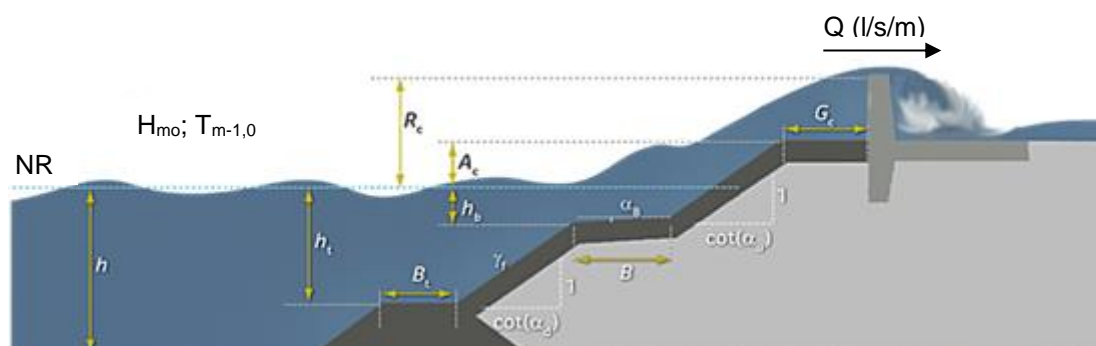


Figura 2.11- Esquema dos parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING2 (adaptado de [3]).

Tabela 2.4- Parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING e respectivos limites de aplicabilidade referentes a uma altura significativa de onda $H_{m0}=1,0\text{m}$.

Parâmetro	Tipo	Máximo	Mínimo
H_{m0} [m]	Condição de agitação marítima	1,0	1,0
$T_{m-1,0}$ [s]	Condição de agitação marítima	-	-
β [°]	Condição de agitação marítima	80,0	0,0
h [m]	Geometria da estrutura	20,0	0,9
h_b [m]	Geometria da estrutura	5,0	-1,0
h_t [m]	Geometria da estrutura	20,0	0,5
B [m]	Geometria da estrutura	15,0	0,0
B_t [m]	Geometria da estrutura	10,0	0,0
$\tan \alpha_B$ [-]	Geometria da estrutura	0,1	0,0
$\cot \alpha_d$ [-]	Geometria da estrutura	5,0	0,5
$\cot \alpha_u$ [-]	Geometria da estrutura	10,0	-1,0
R_c [m]	Geometria da estrutura	5,0	0,5
A_c [m]	Geometria da estrutura	5,0	0,0
G_c [m]	Geometria da estrutura	10,0	0,0
γ_f [-]	Geometria da estrutura	10,0	0,0

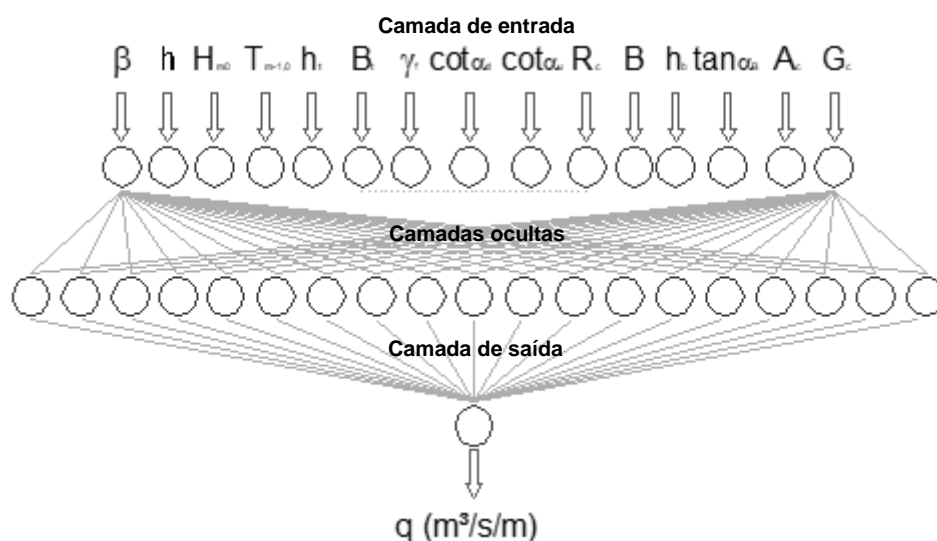


Figura 2.12- Exemplo representativo de como se processa a informação na ferramenta de cálculo NN_OVERTOPPING

Formula de Mase et al. (2013)

A fórmula de Mase et al. (2013), que doravante será referida como fórmula de Mase, aborda a correspondência entre a cota de espraçamento (*run-up*- R_u) e o galgamento de estruturas localizadas junto ou acima da linha de costa. Com o objetivo de facilitar a sua aplicação, a metodologia propõe a utilização das características das ondas em águas profundas como parâmetros de entrada e adota o conceito de declive imaginário para a avaliação da correspondência entre o comportamento das ondas que rebentam na costa. O declive imaginário proposto por Saville (1958) é usado para o cálculo do espraçamento/galgamento, tendo em conta que o declive em frente à estrutura de proteção é, na maioria dos casos, irregular. Este declive imaginário é uma linha que une dois pontos, um sobre o fundo do mar no local onde ocorre a rebentação, à profundidade h , e outro no limite do espraçamento da onda, à cota R_u . A aplicação do declive imaginário tem em consideração a configuração da secção transversal da frente de praia, *foreshore*, mas também da estrutura, como é apresentado na Figura 2.13.

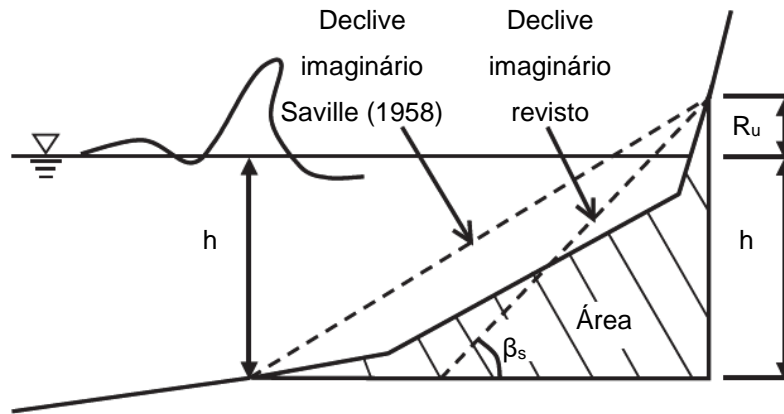


Figura 2.13-Esquema do declive imaginário tendo em conta a configuração da secção transversal da frente de praia e da estrutura (adaptado de [9]).

O declive imaginário é obtido através da fórmula:

$$\frac{1}{\tan\beta} \approx \cot\beta_s = \frac{2 \cdot A}{(h + R_u)^2} \quad (2.17)$$

Em que $\tan\beta_s$ representa o declive imaginário, A representa a área da secção transversal da estrutura e da faixa litoral submersa entre a zona de rebentação e a cota de espraçamento, h representa profundidade a que se dá a rebentação e R_u representa a cota de espraçamento.

Para a obtenção de h utiliza-se a fórmula de Mase e Kirby [9]:

$$\frac{h}{H_0} = a_0 + a_1 \exp \left[- \left(\frac{\ln\{(H_s/L_0)/a_2\}}{a_3} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

$$a_0 = 30,247 - 27,3440 \exp \left[- \left(\frac{\ln(22,9130i)}{5,4509} \right)^2 \right] \quad (2.9)$$

$$a_1 = -9,9467 + 8,9213 \exp \left[- \left(\frac{\ln(29,3880i)}{3,1264} \right)^2 \right] \quad (2.10)$$

$$a_2 = 0,0302 - 0,0023 \exp \left[- \left(\frac{\ln(25,9160i)}{1,7065} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

$$a_3 = 6,1291 - 3,5001 \exp \left[- \left(\frac{\ln(36,3660i)}{1,3457} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

em que H_s é a altura de onda na zona de rebentação e L_0 o comprimento de onda ao largo, dado por:

$$L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (2.13)$$

Após obtido h , é possível estimar $R2\%$ (cota de espraçamento com 2% de probabilidade de ser excedida) através de um processo iterativo, tendo como condição inicial $R2\%=2H_s$, e tendo em conta que o declive imaginário é função do $R2\%$ (eq.2.17), sendo que $R2\%$ é dado por:

$$R2\% = 2,99 - 2,73 \exp(-0,57 \tan \beta / \sqrt{H_s/L_0}) \quad (2.14)$$

Uma vez calculado o $R2\%$, é-lhe aplicado um fator de redução, $\gamma_f=0,9$, para ter em conta o efeito da rugosidade da estrutura.

Sabendo o $R2\%$, é calculado o $R_{m\acute{a}x}=1,54R2\%$. Se $R_{m\acute{a}x}<R_c$ não existe galgamento. Caso $R_{m\acute{a}x}>R_c$ existe galgamento e o mesmo é dado por:

$$Q = \sqrt{gH_s^3} \left(0,018 \left(\frac{R_{m\acute{a}x}}{H_s} \right)^{3/2} \left[1 - \left(\frac{R_c}{H_s} \right) / \left(\frac{R_{m\acute{a}x}}{H_s} \right) \right]^{3,2} \right) \quad (2.15)$$

O caudal Q é ainda multiplicado por um fator de redução, C_r , que tem em conta o efeito da berma da estrutura no galgamento e é definido por:

$$C_r = 3,06 \exp \left(-1,5 \frac{G_c}{H_s} \right) \quad (2.16)$$

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Zona de estudo

O concelho da Figueira da Foz encontra-se delimitado pelos concelhos de Cantanhede a norte, Montemor-o-Velho e Soure a leste, Pombal a sul, e pelo Oceano Atlântico a oeste, localizando-se assim, no centro litoral de Portugal. Esta localização coloca o concelho da Figueira da Foz numa situação bastante auspiciosa não só a nível regional, como também nacional. Ocupa uma área de 379,1 km² e, do ponto de vista físico, é atravessado pelo rio Mondego que divide o território municipal em dois grandes sectores: um sector norte e um sector sul, que possuem características demográficas e socioeconómicas distintas.

Relativamente à demografia, o concelho da Figueira da Foz, localizado numa área de grande dinamismo económico e forte crescimento demográfico, ainda que menos visível na última década, com 62125 habitantes em 2011, é o segundo município mais populoso da sub-região do Baixo-Mondego, dividindo 24480 famílias por 43280 alojamentos [11]. A estrutura etária da população residente, reflete ainda uma crescente diminuição da população mais jovem e aumento das classes mais idosas, o que demonstra de modo bem claro a ascendente tendência para o envelhecimento da população, Figura 3.1.

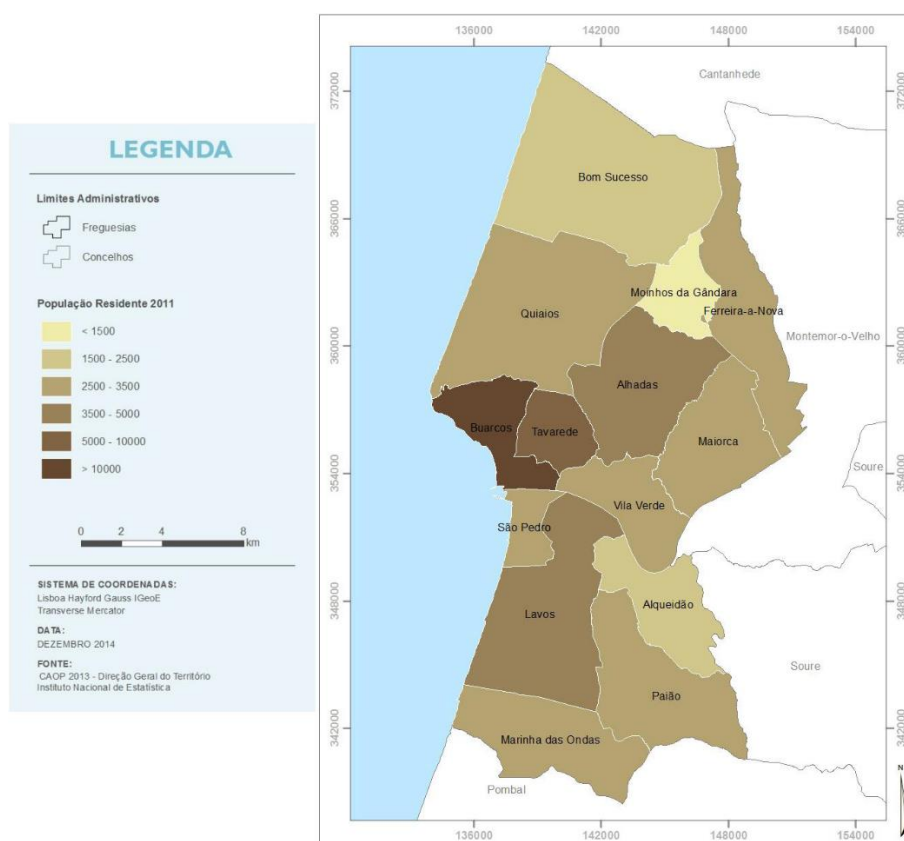


Figura 3.1- Concelho da Figueira da Foz, respetivas freguesias e população residente à data de 2011 [11].

É indiscutível que estas características demográficas, assim como as características relacionadas diretamente com a extensa linha de costa, com a presença do vasto estuário, e com a presença de obras importantes como o Hospital Distrital da Figueira da Foz e muitas outras habitações a apenas dezenas de metros da linha de costa, devem ser assumidas como peças fulcrais em toda a demarcação da suscetibilidade dos riscos naturais no território municipal.

O concelho tem uma extensão de linha de costa de aproximadamente 40 km compreendida entre o concelho de Cantanhede, a norte, e Pombal, a sul. Dentro desta zona, a zona costeira em estudo corresponde à frente marítima da povoação da Gala-Cova, que tem uma linha de costa com extensão de aproximadamente 3 km e direção de alinhamento médio de 19,6°N.

A zona costeira a sul da Figueira da Foz que inclui as frentes marítimas da Gala-Cova, Costa de Lavos e Leirosa (de norte para sul), é formada por um sistema arenoso praia-duna que evoluiu, desde meados do século passado, sob influência de intervenções humanas de diversos tipos. As intervenções mais relevantes a destacar são [12]:

- A construção dos molhes da embocadura do rio Mondego (1961-1965);
- A extração de areia na praia da Figueira da Foz (1973-1996);
- As intervenções de regularização fluvial, para defesa contra as cheias, para regadio e para produção hidroelétrica (dispersas no tempo);
- As intervenções de regularização portuária, para melhorar a utilização do porto;
- As dragagens da embocadura para acesso ao porto (dispersas no tempo);
- A alimentação artificial pontual 50m a sul do enraizamento do molhe sul e 2,25m acima do nível médio do mar (NMM) (1973-1976);
- A construção das defesas longitudinais aderentes da Gala-Cova e Leirosa (1975);
- A construção do campo de 5 esporões da Gala-Cova (EGC) (1978-1979);
- A construção do esporão da Leirosa (1978) e a construção do esporão da Costa de Lavos (ECL) (1979);
- O prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego (2008-2010).

As intervenções a sul da Figueira da Foz tornaram-se necessárias a partir dos anos 70, pois foi quando se verificou a maior gravidade relativamente à erosão costeira a sul do molhe sul da embocadura do rio Mondego (Simões e Castanho, 1978). A situação era tão gravosa que, com os invernos marítimos de 1971-1972, a segurança de muitas edificações situadas sobre a duna foi colocada em perigo.

Com base em dados referentes a uma análise topo-hidrográfica realizada entre 1975, 1978 e 2011, é possível registar a seguinte evolução morfológica da costa de Gala-Cova [13]:

- I. Entre 1975 e 1978, desde o molhe sul da embocadura do rio Mondego até ao último esporão da Gala-Cova, o balanço sedimentar ocorrido foi negativo, isto é, predominou a erosão em todo o troço, com um balanço sedimentar negativo correspondente a 66% do volume total de areia mobilizado no referido período.
- II. Entre 1978 e 2011, o assoreamento foi de 68% do volume total mobilizado, sendo predominante em relação à erosão. Este assoreamento verificou-se com maior incidência a barlamar do campo de esporões Gala-Cova construídos entre 1978-1979, e deve-se ao efeito da construção das obras de proteção costeira executadas em 1975 e 1978-1979, ou seja, às defesas longitudinais aderentes e ao campo de EGC respetivamente, em conjunto com a alimentação artificial realizada em 1975-1976.
- III. Entre 1975 e 2011 o volume correspondente ao assoreamento foi cerca de 54% do volume total mobilizado na área em análise, ou seja, o balanço sedimentar entre 1975 e 2011 resultou em assoreamento. Contudo, cerca de 33% dos 54% do volume de assoreamento foram introduzidos no sistema através de operações de alimentação artificial entre 1975 e 1976. Dado este facto, o balanço sedimentar é negativo, com valor aproximado de $90 \times 10^3 \text{ m}^3$. De referir, no entanto, que na área comum aos levantamentos de 1975 e 2011 está incluída uma zona, a sotamar do último esporão (o mais a sul) da Gala-Cova, onde se observa uma área de forte erosão. Esta zona é responsável por este balanço negativo, que não se constatou na análise da evolução entre 1978 e 2011, precisamente porque não foi abrangida na sua totalidade no levantamento de 1978.

Resumidamente, entre 1975 e 2011, o total do balanço sedimentar foi positivo, estando a linha de costa em 2011 em média cerca de 25 m mais avançada do que 1975. No entanto, a sotamar (Figura 3.2) do último esporão do campo de EGC, o processo erosivo verificado entre 1975-1978 acentuou-se no período 1978-2011.



Figura 3.2- Frente marítima da Gala Cova (© Google Earth).

Torna-se importante também ter em conta que, entre 2008 e 2010, efetuou-se o prolongamento do molhe norte do Porto da Figueira da Foz, Figura 3.3. Como seria espetável, esse prolongamento provocou, nos últimos anos, um assoreamento significativo a norte deste molhe, na praia da Figueira da Foz, o que contribuiu para o aumento da erosão verificada nas praias a sul, como é o caso da praia da Gala-Cova [13].



Figura 3.3- Prolongamento do molhe norte do Porto da Figueira da Foz. Fotografias de 2006 e 2015, respetivamente à esquerda e direita (© Google Earth).

Esta dissertação centra-se nas obras longitudinais de proteção costeira da Gala-Cova, isto é, nas estruturas de defesa aderente existentes de forma intercalada com o campo de esporões da Gala-Cova (EGC), a sul do molhe sul do Porto da Figueira da Foz. Estas obras têm como função proteger a povoação da freguesia de São Pedro Cova-Gala, cuja população residente era, pelo censo de 2011 (<http://www.spcovagala.pt/home.php?t=ct&c=17>), de 2910 pessoas, e os respetivos equipamentos, entre os quais se destaca o Hospital Distrital da Figueira da Foz.

Na Figura 3.4 é possível observar a principal estrutura visada neste estudo, a estrutura de proteção marginal aderente que protege as habitações e a via pública de condições de agitação marítima mais graves. A estrutura, é definida por uma defesa aderente, composta por um enrocamento de pedras com declive 0,272, uma cota de coroamento de 13m e uma largura de coroamento de 8,7m. É composta ainda por um pequeno muro vertical com 0,5 m de altura e 0,5m de largura.



Figura 3.4- Estrutura de proteção marginal, praia da Gala-Cova.

3.2. Dados de hidrodinâmica e morfologia

3.2.1. Agitação marítima

As ondas de gravidade e o seu estudo, são fundamentais para a engenharia e para os problemas ambientais, tanto em oceano aberto, como em zonas costeiras. Por esse motivo, é fundamental ter conhecimento sobre a variabilidade espacial e temporal da agitação marítima.

Na presente dissertação foram usados dados de previsão da agitação marítima entre os anos de 1953 e 2009, no ponto de coordenadas 10.0°W e 40.0°N, obtidos através da aplicação de um modelo de

onda espectral, validado, com uma resolução espacial de 0.5° e um passo temporal de 6 horas, obtendo-se assim os parâmetros da série temporal da altura significativa de onda (H_s), do período de pico (T_p) e da direção média de incidência (Dir).

O modelo matemático foi forçado com campos de vento de frequência igual a 6 horas no âmbito do projeto de reanálise elaborado pelo NCEP (*National Centers of Environmental Prediction*) em consonância com o NCAR (*National Center of Atmospheric Research*). Os campos de vento foram interpolados com uma grelha padrão de 0.5° . Desprezaram-se as interações das ondas com as correntes, assumindo que são insignificantes na escala do Oceano Atlântico Norte. A zona glacial também não foi considerada, uma vez que os dados necessários não se encontram disponíveis para todo o período de tempo estudado.

A validação do modelo foi efetuada através da comparação de resultados com os dados registados em bóias ao longo do período de tempo em análise para diversos locais, cobrindo, tanto quanto possível, as extensões de tempo e espaço do estudo. Na Figura 3.5 estão indicadas as bóias em causa: três bóias da costa portuguesa (Sines (SIN), Figueira da Foz (FIG) e Leixões (LEI)) e duas bóias da costa espanhola (Cabo Silleiro (SIL) e Bilbao-Vizcaya (BIL)). Uma comparação adicional, foi realizada com os dados do *Ocean Weather Station (OWS)* “Juliett” ($20.0^\circ W$ $52.5^\circ N$) para cobrir o período 1952-1975 [14].

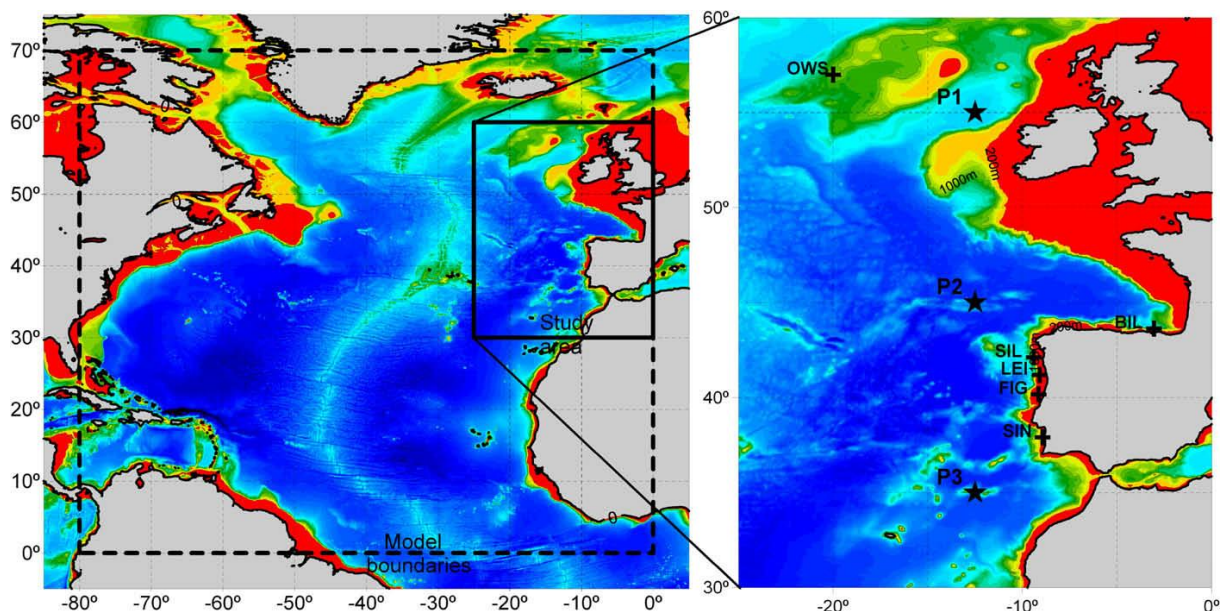


Figura 3.5- Mapa batimétrico do norte do Oceano Atlântico da zona modelada (esquerda) bem como da zona de estudo (direita) com as respetivas bóias [5].

3.2.2. Nível do mar

No presente estudo foi considerada a variação do nível do mar devido a dois fatores, a maré meteorológica e a maré astronómica. O método aplicado assentou o seu desenvolvimento em dados de *hindcast* do software XTide (baseado no modelo *WXTide32*) e de um modelo aplicado por Fortunato et al. (2014) [15].

O software *XTide* (de livre acesso e disponível para sistema operacional *Windows*) fornece previsões de maré astronómica numa ampla variedade de formatos. O algoritmo a que o XTide recorre para prever marés é usado pelo National Ocean Service dos Estados Unidos da América e é significativamente mais preciso do que todos os outros métodos de previsão de maré existentes. O modelo permite obter previsões astronómicas desde 1970 até 2037, referidas a mais de 9500 estações em todo o mundo, das quais se salienta a estação portuguesa da Figueira da Foz, de coordenadas 40°9'N e 8°52'W, utilizada neste estudo. Como output, através do comando incremental tide, o *WXTide32* permite obter a lista de previsões para a estação selecionada com um passo de 1 a 1440 minutos e até 99 dias de cada vez.

Para a verificação dos resultados do *WXTide32*, foram comparadas as previsões do nível do mar (NM) obtidas com o *WXTide32* com as previsões obtidas pelo Instituto Hidrográfico (IH), disponibilizadas no website da instituição, para os mesmos eventos de baixa-mar e preia-mar, com o objetivo de avaliar a concordância entre as duas fontes. Apresenta-se na Tabela 3.1 os valores obtidos para dois períodos distintos, de 8 a 9 de Março e de 10 a 11 de Abril de 2015, através do *WXTide32* e do IH.

Verificou-se que as previsões do nível do mar são mais elevadas, sendo que a diferença de nível entre as condições de baixa-mar e preia-mar, apesar de não ser constante, é sistemática, apresentando-se mais elevada no caso da preia-mar. Desta forma, tratando-se de previsões de maré astronómica com valores próximos nas duas fontes, o que suporta a fiabilidade do software, foram extraídos do *WXTide32* os valores que formam a série temporal do nível do mar, de 6 em 6 horas, para o período de 1970 a 2010, com as devidas correções referentes ao horário de verão. Os valores são referidos ao zero hidrográfico (ZH).

Tabela 3.1- Previsões do nível do mar obtidas através do *WXTide32* e do IH.

	Hora [hh:mm]	NM <i>WXTide</i> [m]	Hora [hh:mm]	NM IH [m]	Diferença (IH- <i>WXTide</i>) [m]	Maré
08/03/2015	04:22	3,23	04:14	3,37	0,14	PM
	10:19	0,62	10:16	0,68	0,06	BM
	16:38	3,1	16:30	3,27	0,17	PM
	22:31	0,64	22:26	0,71	0,07	BM
09/03/2015	04:45	3,12	04:45	3,29	0,17	PM
	10:57	0,68	10:46	0,76	0,08	BM
	17:13	3,01	17:02	3,2	0,19	PM
	23:16	0,73	22:58	0,79	0,06	BM
10/04/2015	01:08	0,9	00:56	0,96	0,06	BM
	07:21	2,7	07:17	2,92	0,22	PM
	13:29	1	13:16	1,09	0,09	BM
	19:42	2,8	19:43	2,96	0,16	PM
11/04/2015	02:02	1,1	01:50	1,11	0,01	BM
	08:15	2,6	08:14	2,76	0,16	PM
	14:28	1,2	14:15	1,24	0,04	BM
	20:42	2,7	20:46	2,85	0,15	PM
Média					0,11	
Média em PM					0,17	
Média em BM					0,06	

O efeito da maré meteorológica foi tido em conta através de dados de previsão do nível do mar gerados com base num modelo de *hindcast* de 250 m de resolução na plataforma continental Portuguesa, com erros quadráticos médios da ordem de 0,02-0,05 m e níveis extremos com erros máximos da ordem dos 0,15 m [15]. Estes dados são relativos ao período de 1980 a 2006 e são definidos por séries tri-hóricas de níveis relativos ao ZH. Após ser feita a análise destes dados em comparação com os dados provenientes do *WXTide32* mostrou-se necessário compatibilizar as ocorrências de baixa-mar e preia-mar das duas fontes. De seguida, foi extraída parte da série temporal correspondente à sobre-elevação meteorológica para o período de 1980 a 2006 subtraindo o nível do *WXTide32* ao correspondente nível dos dados de *hindcast*. Devido ao facto de os fenómenos meteorológicos serem aleatórios, admitiu-se a repetição da série de maré meteorológica de 1980 a 2006 nos restantes períodos.

A série temporal final do nível do mar de 1952 a 2010 resulta da composição das componentes de maré astronómica e meteorológica apresentadas, tendo em conta a ocorrência de anos bissextos.

3.2.3. Perfil transversal

Para o desenvolvimento da presente dissertação foi tida em conta toda a evolução morfológica da zona costeira da frente marítima da Gala-Cova no período de 1975 e 2011 através de três levantamentos topo-hidrográficos, que abrangeram não só a parte emersa da praia, mas também a parte submersa.

Como já foi referido na secção 3.1, relativa à evolução da morfologia costeira na frente marítima da Gala-Cova, todas as intervenções antrópicas realizadas entre 1975 e 2011, nomeadamente as obras de proteção costeira (1975-1979), as defesas longitudinais aderentes e o campo de esporões da Gala-Cova, em conjunto com a alimentação artificial (1975-1976), limitaram o andamento da vaga erosiva verificada no período compreendido entre 1975 e 1978. Como consequência de todas estas obras, em 2011 a linha de costa encontrava-se 25m em média mais avançada do que em 1975. Em contraste, imediatamente a sul do último esporão do campo de esporões de Gala-Cova, o surto erosivo verificado entre 1975 e 1978 intensificou-se bastante no período 1978-2011.

Os dados utilizados para o estudo da evolução morfológica do perfil transversal da zona de estudo têm como base três períodos distintos: o primeiro tem origem no levantamento topo-hidrográfico realizado no período Maio-Agosto de 1975 pela Direção Geral de Portos (informação referida ao Datum vertical ZH); o segundo tem origem no levantamento topo-hidrográfico realizado em Junho de 1978 pela Direção Geral de Portos (informação referida ao Datum vertical ZH); o terceiro tem origem no levantamento topo-hidrográfico realizado com pelo Instituto Geográfico Português e Instituto da Água, com tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), numa faixa de captura de um quilómetro de largura ao longo da costa, cerca de 600 m em mar (batimetria) e 400 m em terra (topografia), com resolução de 2 m, durante o ano de 2011.

A metodologia usada teve de ser adaptada ao formato dos levantamentos existentes. Primeiro, foi necessária a recuperação e digitalização dos levantamentos de Maio-Agosto de 1975 e Junho de 1978 existentes em formato de papel. Seguidamente, foi feita uma georreferenciação dos levantamentos anteriores no sistema PT-TM06/ETRS89, à qual se seguiu a elaboração de um modelo digital de terreno (MDT) para cada levantamento, com recurso a software de mapeamento de superfícies. Para a identificação dos padrões de erosão/assoreamento ocorridos foram comparados os MDTs correspondentes as datas 1975-1978, 1978-2011 e 1975-2011. Foi ainda definido um sistema cartesiano local, com origem no ponto de coordenadas ETRS89 (-72070 m; 21875 m) e eixo-x com orientação 19,6°N, que é a direção do alinhamento médio da isolinha de NMM em 2011, bem como a extração da isolinha de batimetria correspondente ao nível 2,00 m acima do ZH de cada MDT e sua georreferenciação no sistema local para comparação e avaliação da evolução (reco/avanço) da linha de costa.

A avaliação da evolução do perfil transversal da zona ativa da praia na zona de estudo teve como base um perfil (P4), dos dezoito perfis transversais topo-hidrográficos definidos no âmbito da caracterização

da morfologia costeira recente do trecho compreendido entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis. É importante referir que a localização dos dezoito perfis foi definida com o objetivo de observar eventuais variações morfológicas longilitoriais, e tendo em conta os cinco sub-trechos litorais, limitados pelas estruturas costeiras transversais existentes construídas (esporões) e naturais (promontório), Figura 3.6.



Figura 3.6-Localização dos perfis topo-hidrográficos P1 a P18 e vista aérea da frente marítima da zona de estudo Gala-Cova (adaptado de [13])

A evolução do perfil P4 localizado entre o terceiro e o quarto esporões (Norte-Sul) pode ver-se na Figura 3.7. Nota para as defesas longitudinais aderentes que tendo sido construídas em 1975 já influenciaram a evolução do perfil. Da mesma forma, mas a partir de 1978, a evolução dos perfis passou também a ser afetada pela construção do campo de esporões.

Entre 1975 e 1978 o perfil transversal P4 apresentou estabilidade entre o ZH e o NMM, recuo entre o NMM e o nível 6 m ZH e assoreamento abaixo do ZH. Este comportamento dever-se-á à presença da defesa longitudinal aderente, que fixou o perfil acima do nível 6 m ZH, e ao enchimento artificial anual realizado a barlamar, entre 1973 e 1976, que terá sido transportado por ação das correntes litorais induzidas pelas ondas, predominantemente de norte para sul.

Entre 1978 e 2011 o perfil P4 apresentou erosão abaixo do ZH e assoreamento acima deste nível, mais precisamente acumulação de cerca de $280 \text{ m}^3/\text{m}$ de areia entre o ZH e o nível 6 m ZH.

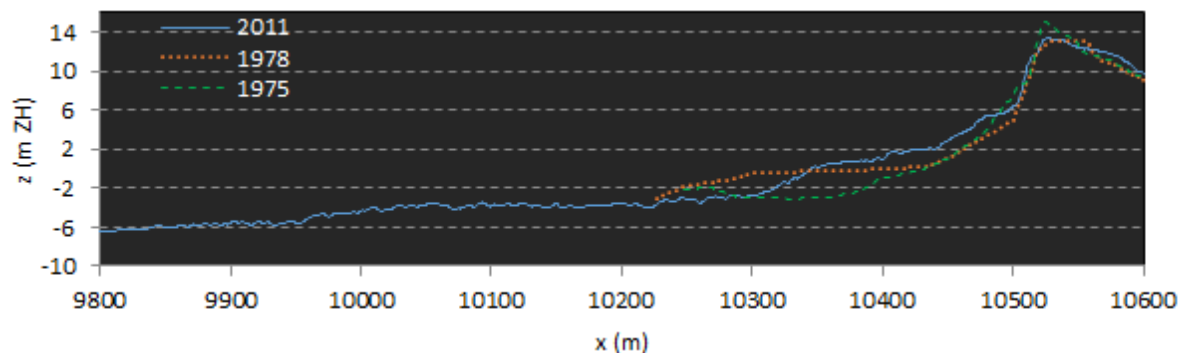


Figura 3.7- Evolução do perfil transversal P4 da zona de estudo, Gala-Cova, entre os esporões 3 e 4 (Norte-Sul), 1975-2011.

Estes resultados mostram que o campo de esporões da Gala-Cova veio fortalecer o perfil de praia localizado a meio dos respetivos sub-trechos para elevações do perfil acima do ZH, independentemente do sub-trecho ser superiormente limitado ou não por defesa longitudinal [13].

Para o caso de estudo foram usados os perfis aproximados (sintetizados a partir dos observados) representados na Figura 3.8 para possibilitar a aplicação das ferramentas de cálculo do fenómeno de galgamento que foram descritas na seção 2.2.4. de acordo com as condições de aplicabilidade das mesmas.

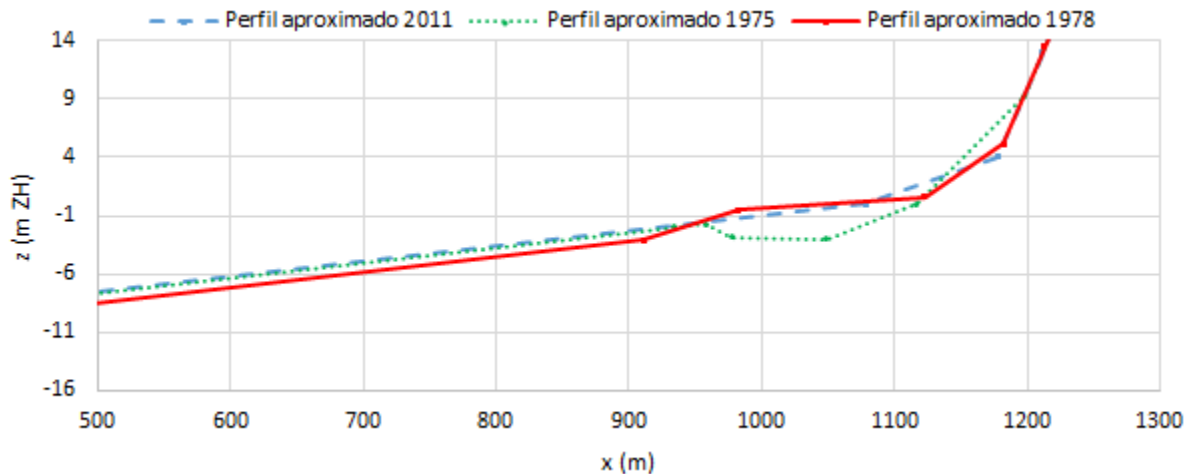


Figura 3.8-Perfis aproximados para a aplicação da metodologia de cálculo do galgamento.

4. ANÁLISE DE DADOS DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

4.1. Características gerais

Com os dados de agitação marítima obtidos entre os anos de 1953 e 2009 no ponto de coordenadas 10.0°W e 40.0°N, disponíveis na zona de estudo e descritos na secção 3.2.1., e com a finalidade de averiguar sobre tendências de alteração das suas características, analisou-se a variação dos parâmetros gerais Hs, Tp e Dir, ao longo do tempo. Para estes parâmetros foi feita uma análise geral, para os meses de inverno, mas também para cada trimestre de cada ano, obtendo assim uma visão geral de todos os registos.

No que se refere à altura significativa de onda, Hs, pode-se observar através da Figura 4.1 que, após 1991, as oscilações entre os valores máximos e mínimos da altura significativa de onda aumentam, o que se pode verificar também na Figura 4.2, onde é visível o aumento do desvio padrão quer nos meses de inverno, quer na análise trimestral. Já no que se refere ao valor de Hs máximo anual, Figura 4.3, não se observa nenhuma tendência, já que as oscilações são aproximadamente uniformes entre 1953 e 2009.

Analisada a direção ao longo do tempo, Figura 4.4, é possível afirmar que a direção média manteve oscilações aproximadamente uniformes ao longo do tempo, variando entre 275°N e 320°N, tendo havido apenas uma época (1962 e 1970) em que as variações foram mais significativas, Figura 4.5. De referir apenas, no contexto da direção máxima, Figura 4.6, as grandes oscilações que se verificaram a partir do ano 2000.

De acordo com a Figura 4.7 e Figura 4.9, que mostra a variação do período de pico (Tp) ao longo dos anos, observa-se que, tanto a nível de valores médios como a nível de valores máximos respetivamente, não existe nenhuma oscilação significativa de valores a relatar, como é possível confirmar na Figura 4.8, através dos valores de desvio padrão, que apresenta uma linha de tendência praticamente reta.

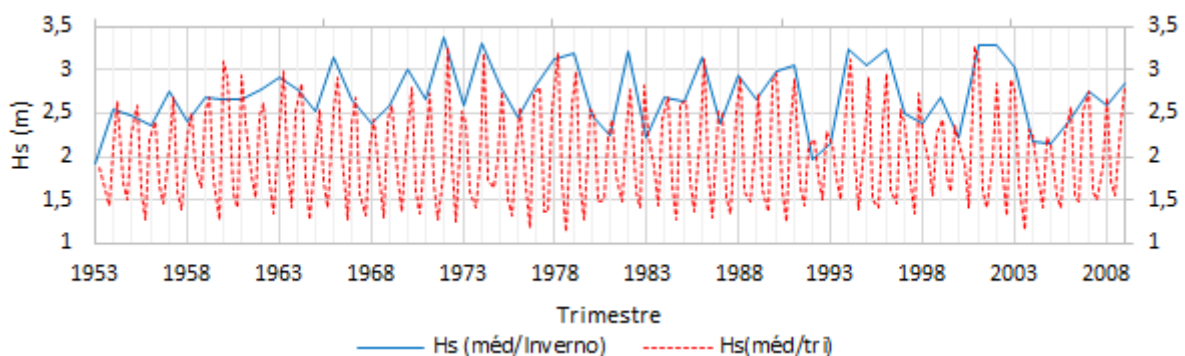


Figura 4.1- Variação da média de Hs nos meses de inverno e trimestral.

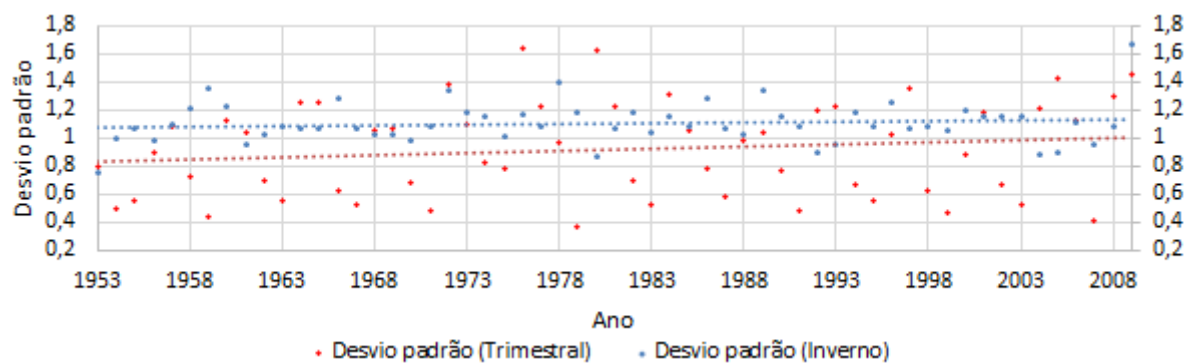


Figura 4.2- Desvio padrão dos dados associados à Figura 4.1

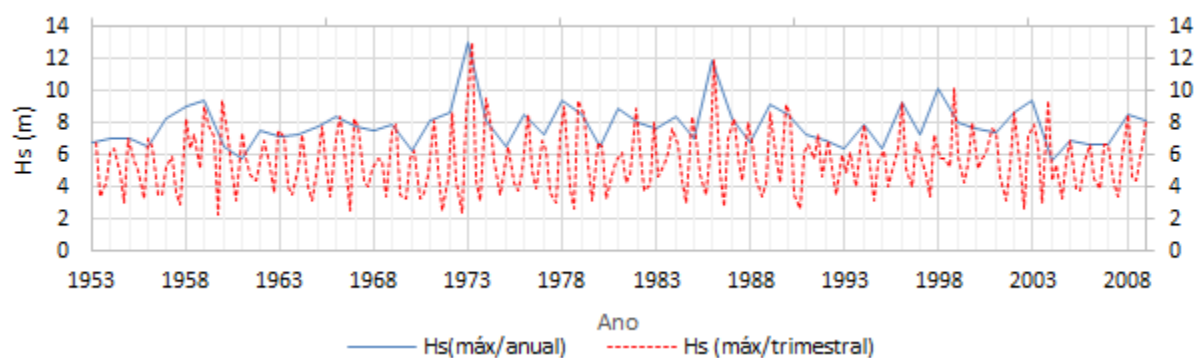


Figura 4.3- Valores máximos anuais e trimestrais de Hs.

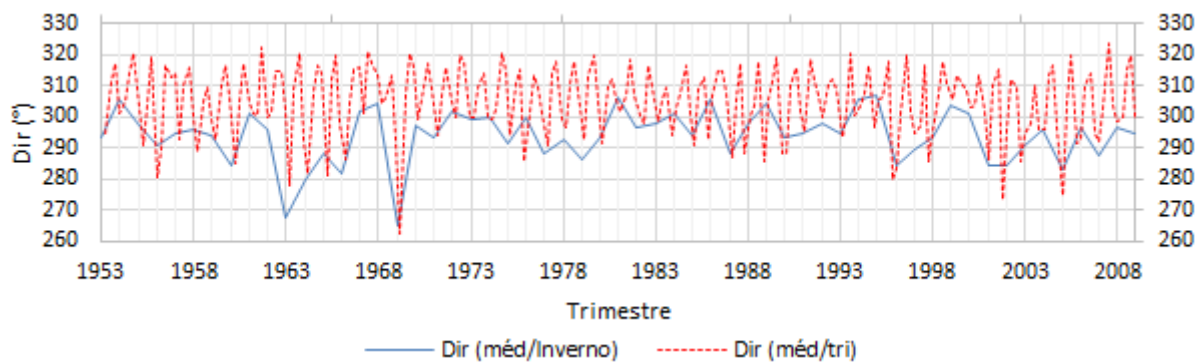


Figura 4.4- Variação da média da direção nos meses de inverno e trimestral no tempo.

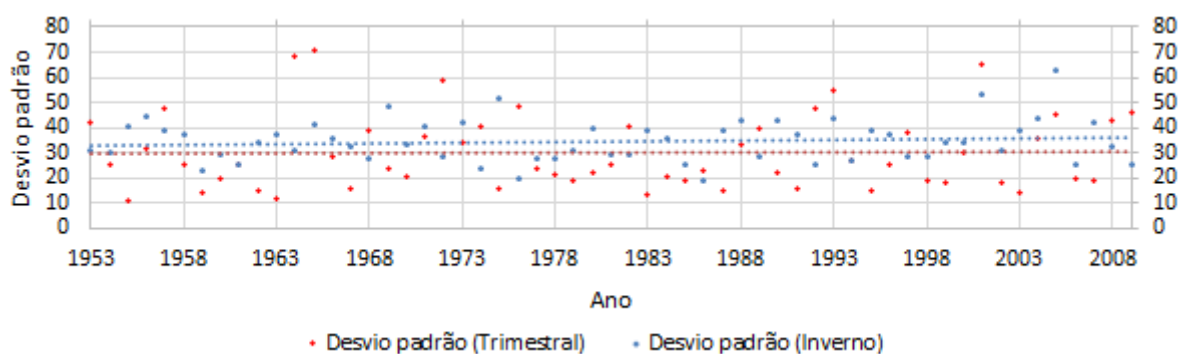


Figura 4.5- Desvio padrão dos dados associados à Figura 4.4.

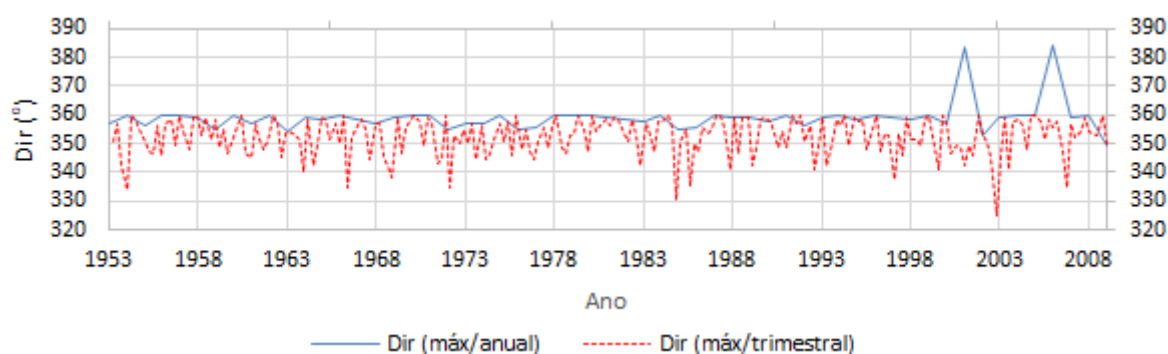


Figura 4.6- Valores máximos anuais e trimestrais da direção de agitação.

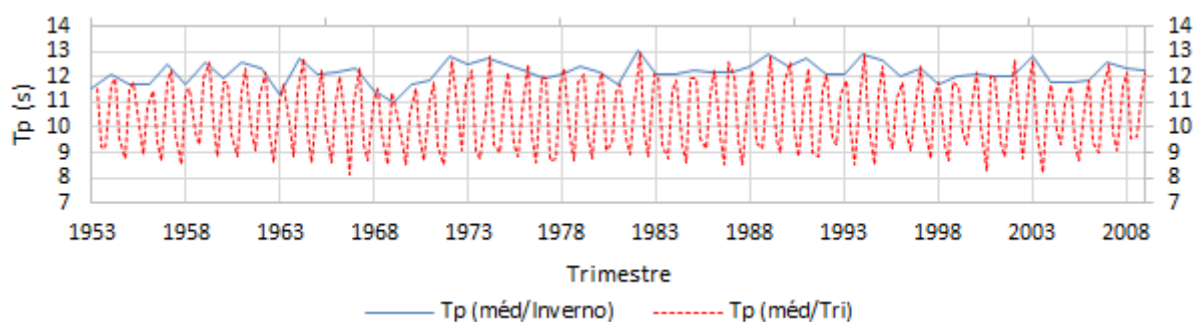


Figura 4.7- Variação da média do período de pico nos meses de inverno e trimestral no tempo.

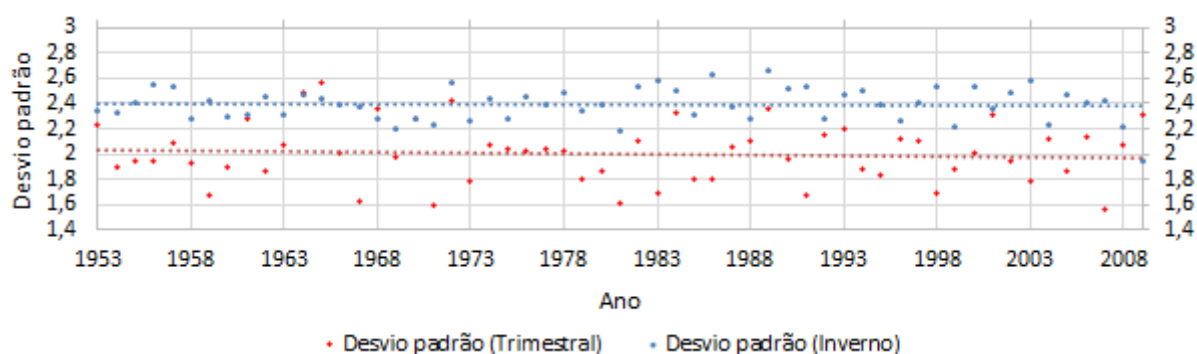


Figura 4.8- Desvio padrão dos dados associados à Figura 4.7.

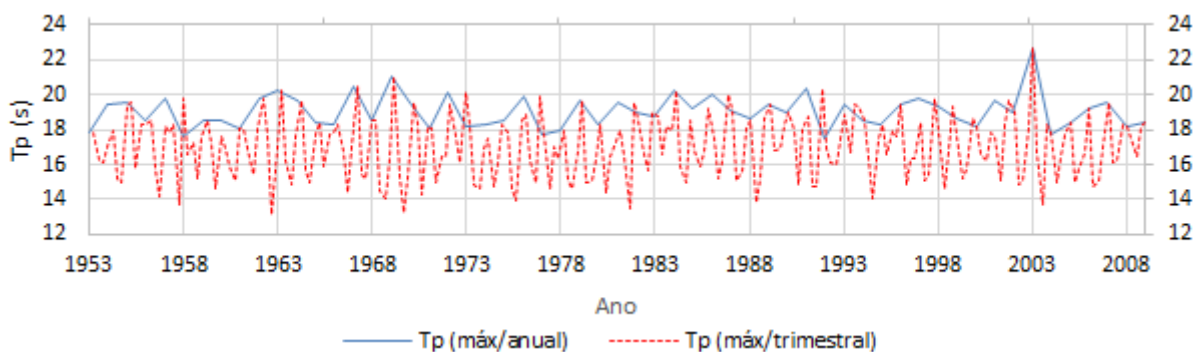


Figura 4.9- Valores máximos anuais e trimestrais do período de pico.

4.2. Condições de temporal

Um temporal pode ser definido de uma forma simples como uma violenta perturbação atmosférica caracterizada principalmente por ventos fortes, chuvas, entre outros elementos. Quando isso acontece os impactos mais imediatos a nível marítimo são o aumento da altura significativa das ondas e por vezes, o aumento do período de pico e do nível médio do mar [16].

Para se realizar o estudo de um temporal marítimo, é fundamental definir o critério de temporal tendo em conta três condições fundamentais: a altura significativa da onda deve ser igual ou superior a um valor limite crítico, $H_{s_{crit}}$, o valor de H_s deve permanecer superior a esse valor limite por um mínimo de 6 horas e a diferença de tempo entre dois temporais deve ser também superior a 48 horas, caso contrário estamos na presença do mesmo temporal [16]. Desta forma, todos os registos que verificarem estas três condições são considerados eventos de um determinado temporal individual.

Para a realização da presente dissertação foi definido [17],

$$H_{s_{crit}} = \frac{1}{2} \overline{H_s}_{máx_{anual}} \quad 3.1$$

Com base na equação (3.1), obteve-se um valor de $H_{s_{crit}} = 4,0m$. Após a análise das características gerais dos dados, foi efetuado um estudo para as condições de temporal no período em análise. Entre 1953 e 2009 foram registados 565 temporais no local em estudo, que variaram de 4 a 18 por ano, como é possível confirmar através da Figura 4.10, onde se apresenta o número de temporais por ano, considerando a definição de temporal acima descrita. De referir que dos 565 temporais obtidos, 515 (91%) acontecem nos invernos marítimos de cada temporada, isto é, entre Setembro e Março. É ainda possível verificar através da linha de tendência um aumento do número de temporais no período temporal 1953-2009.

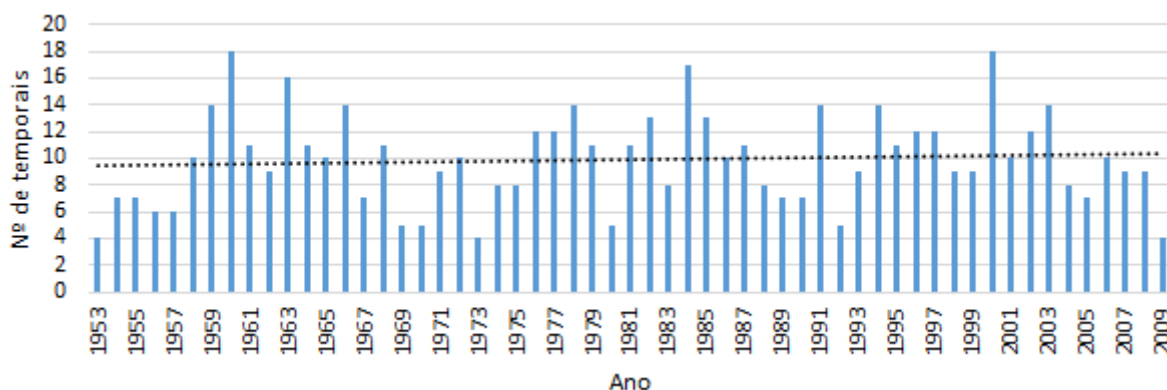


Figura 4.10- Número de temporais registados entre 1953 e 2009.

As variações da média da altura significativa de onda ($H_{s_{méd}}$) e da duração dos temporais ocorridos no período em apreço são apresentadas na Figura 4.11 e Figura 4.12, respetivamente. O $H_{s_{méd}}$ dos

temporais variou entre 4 e 7m sendo que o maior número de ocorrências está no intervalo de 4-5 m, com uma ocorrência de 70%. É possível ainda verificar que apenas 5% dos temporais registaram alturas significativas médias acima dos 6 m.

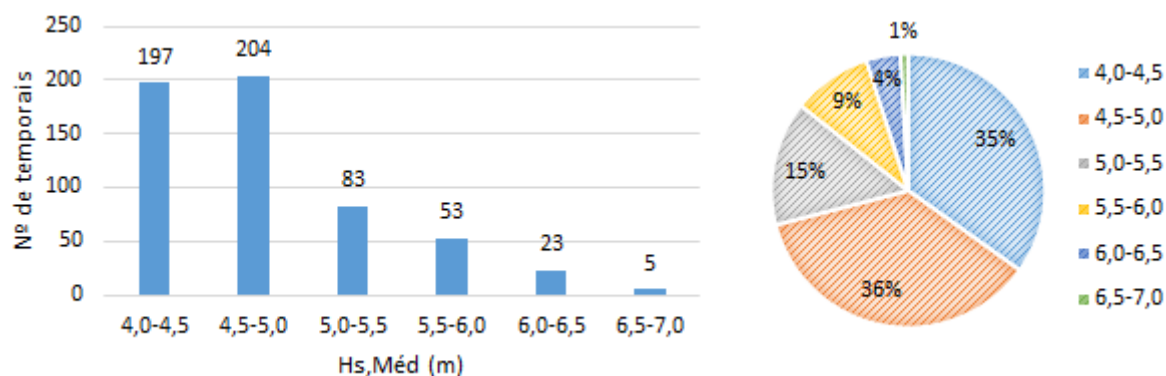


Figura 4.11- Variação de $H_{s\text{méd}}$ nos temporais ocorridos entre 1953-2009.

A duração de cada temporal, Figura 4.12, encontra-se entre os 0,25 e os 15,25 dias, predominando a duração entre os 0,25 e os 1,5 dias com um total de 57% (Figura 4.13). Através da Figura 4.12 é possível observar que a duração dos temporais apresenta uma ocorrência aleatória, sem que seja possível afirmar a existência de qualquer tendência de aumento ou diminuição da mesma.

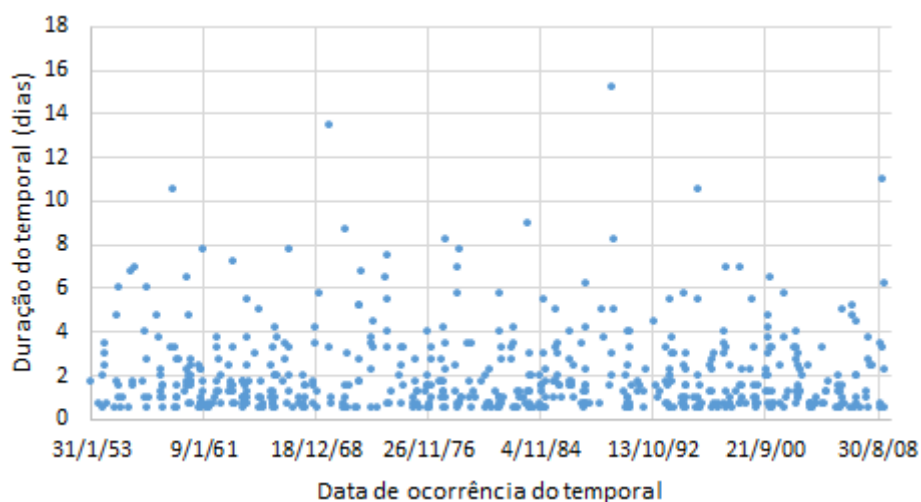


Figura 4.12- Duração de cada temporal registrada ao longo do tempo.

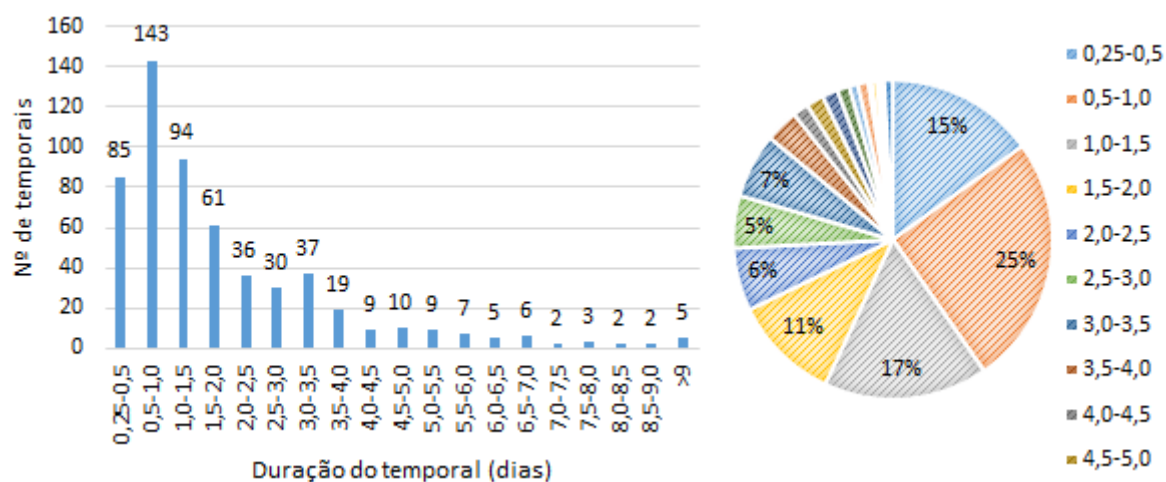


Figura 4.13- Número dos temporais registados em função da sua duração.

Nas Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16 são apresentados os dados relativos à variação da altura significativa de onda média ($H_{s\text{méd}}$), do período de pico médio ($T_{p\text{méd}}$), e da direção média ($Dir_{\text{méd}}$), respetivamente, em função da duração registada para cada temporal. Relativamente à altura significativa de onda média, pode verificar-se, como se tinha referido anteriormente, que os eventos predominantes se encontram num intervalo de altura significativa média entre os 4 a 5 m. É possível verificar ainda que, à medida que o valor médio da altura significativa aumenta, a duração do temporal tem tendência a aumentar, sendo superior a 5 dias para $H_{s\text{méd}}$ entre 4.6 m e 6.3 m.

No que diz respeito à direção média, é possível observar que a maior duração de temporais ocorre para direções entre os 260°N e os 300°N, sendo superior a 5 dias para direções entre 258°N e 316°N.

Para o período de pico verifica-se algo similar, com a presença de temporais de longa duração a verificar-se para períodos de pico a rondar os 10s a 12 s, sendo a duração superior a 5 dias para períodos de pico entre 9.8 s e 13.1 s.

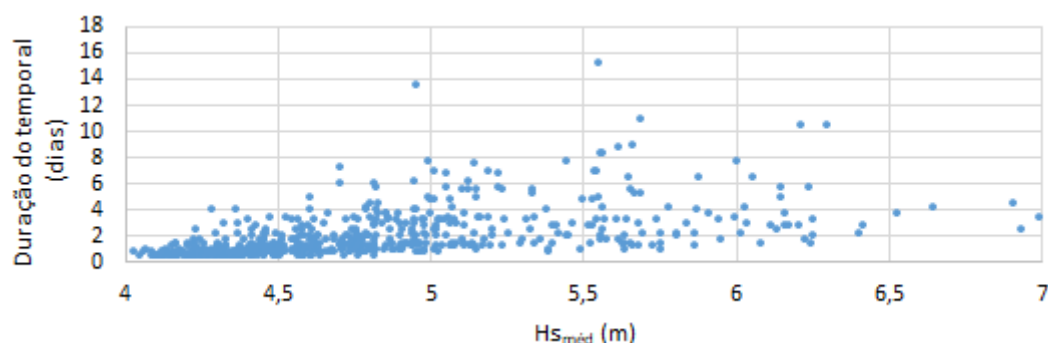


Figura 4.14- Variação do $H_{s\text{méd}}$ com a duração do temporal.

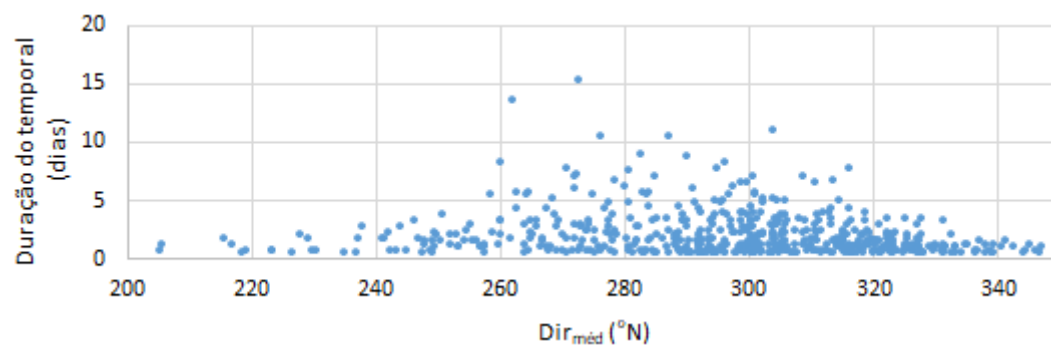


Figura 4.15- Variação da Dir_{méd} com a duração do temporal

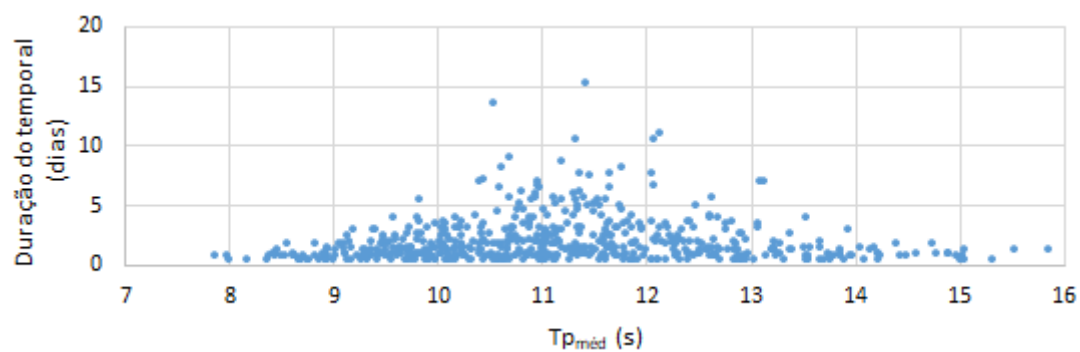


Figura 4.16- Variação do Tp_{méd} com a duração do temporal.

5. ANÁLISE DO GALGAMENTO

Foram aplicados os dois métodos descritos da secção 2.2.4 para o cálculo do caudal médio galgado, Q , sobre a estrutura de proteção: um baseado nas formulações empíricas de Mase, e outro associado às RNA, NN_OVERTOPPING. Contudo, no âmbito da aplicação da ferramenta NN_OVERTOPPING verificou-se que os limites de aplicabilidade da mesma (Tabela 5.1), nomeadamente os respeitantes à estrutura ($\cot\alpha_u$, R_c e G_c), não eram respeitados. No entanto, e a título de teste, procedeu-se à sua utilização, obtendo-se sempre caudais nulos, inviabilizam a sua utilização para o caso de estudo. Desta forma, procedeu-se à análise do galgamento para o caso de estudo usando as formulações empíricas de Mase.

Tabela 5.1- Tabela com os parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING, e os respetivos limites de aplicabilidade referentes a uma altura significativa de onda $H_{m0}=1,0m$

Parâmetro	Tipo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
β [°]	Condição de agitação marítima	90,0	-90,0	-69,5	70,1
h [m]	Geometria da estrutura	20,0	0,9	17,5	
h_b [m]	Geometria da estrutura	5,0	-1,0	0,5	
h_t [m]	Geometria da estrutura	20,0	0,5	3,5	
B [m]	Geometria da estrutura	15,0	0,0	0	
B_t [m]	Geometria da estrutura	10,0	0,0	0	
$\tan \alpha_B$ [-]	Geometria da estrutura	0,1	0,0	0,04	
$\cot \alpha_d$ [-]	Geometria da estrutura	5,0	0,5	0	
$\cot \alpha_u$ [-]	Geometria da estrutura	10,0	-1,0	77	
R_c [m]	Geometria da estrutura	5,0	0,5	10	
A_c [m]	Geometria da estrutura	5,0	0,0	9,5	
G_c [m]	Geometria da estrutura	10,0	0,0	8,7	
γ_f [-]	Geometria da estrutura	10,0	0,0	0,5	

Assim utilizando a equação de Mase [9], calculou-se o caudal médio, Q , que galga a estrutura de defesa costeira em estudo devido à ação conjunta da série temporal agitação marítima e da série sinótica de nível do mar descritas no capítulo 3, considerando o perfil aproximado de 2011 descrito no mesmo capítulo.

Dada a importância que têm na determinação do galgamento, efetuou-se uma análise ao efeito dos parâmetros nível do mar e profundidade a que se consideram os dados de agitação marítima, de forma a perceber como influenciam e condicionam o fenómeno do galgamento sobre a estrutura. Posteriormente foi analisada a influência da variação do perfil transversal arenoso em frente à estrutura de defesa.

Por último, com recurso a dois cenários possíveis, determinou-se o efeito da subida do nível médio do mar devida às alterações climáticas no galgamento da defesa costeira no caso de estudo.

5.1. Influência do nível do mar

No estudo da influência do nível do mar, analisou-se o caudal médio galgado, Q , calculado com a fórmula de Mase para os dados de agitação obtidos a -14 m ZH e -37 m ZH e para duas condições de nível do mar: nível do mar variável devido às marés astronómica e meteorológica; e nível do mar constante e igual a 3,5m, que corresponde ao nível de maré astronómica em condição de preia-mar de águas vivas prevista para o local de estudo em 2017 e 2018 [14].

Na primeira parte desta secção descreve-se a análise da influência do nível do mar efetuada para os dados de agitação marítima obtidos a -14 m ZH. Na segunda parte descrevem-se as principais diferenças encontradas nos resultados de Q para uma análise semelhante realizada para os dados de agitação obtidos a -37 m ZH.

De registar que, dos 86200 dados de *hindcast* para a condição de nível do mar variável, apenas 5% correspondem a um nível de mar acima dos 3,5m (valor fixo para nível do mar constante), o que irá condicionar, como iremos ver, de forma clara o galgamento.

Para os dados de agitação marítima na batimétrica -14 m ZH, foram considerados 86200 eventos, relativos aos dados de *hindcast* mencionados na secção 3.2.2. Para cada evento foi calculado o Q , utilizando a fórmula de Mase para nível de mar constante (NMcte) e variável (NMvar).

Dos 86200 eventos correspondentes ao período em estudo, verificou-se que em 84% dos casos, isto é, em 72493 eventos, o galgamento obtido com a fórmula foi nulo tanto para NMcte como para NMvar. Para os 13707 eventos restantes, em 94% dos eventos obteve-se um Q superior com NMcte (Figura 5.1).

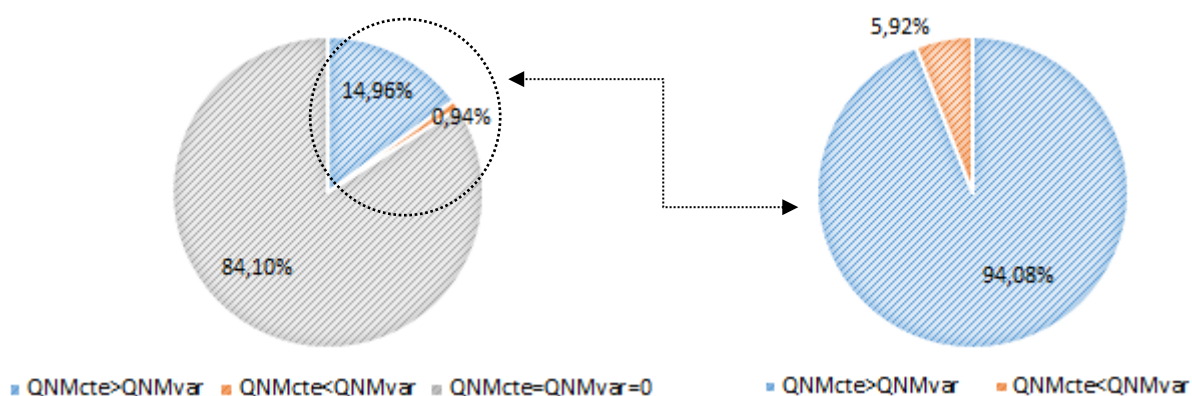


Figura 5.1- Condição de nível do mar em que se enquadram os maiores Q para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

Na Figura.5.2 está representado o Q obtido com o NMcte (QNMcte) e com NMvar (QNMvar) para o total dos 86200 eventos. É possível verificar que o Q é, em geral, superior com NMcte (para 94,1% dos casos o QNMcte é superior ao QNMvar), e em alguns casos é significativamente maior.

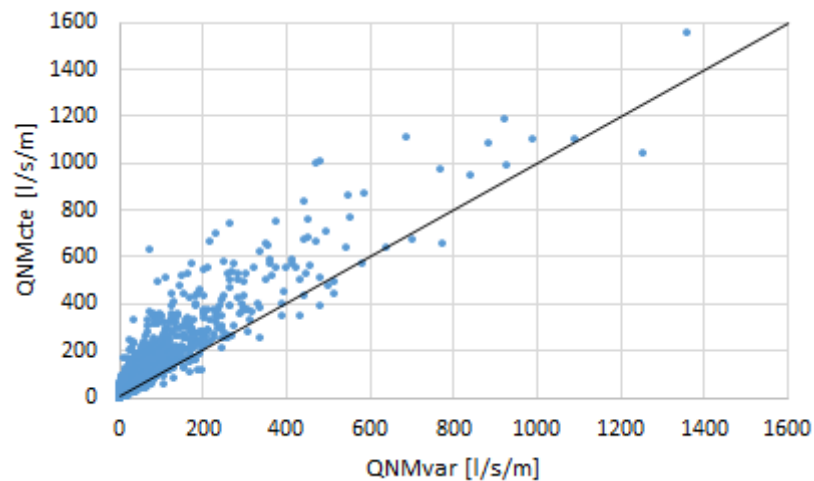


Figura.5.2- QNMcte versus QNMvar para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

Para analisar a influência das condições de agitação marítima em Q, é feita uma análise da variação de Q em função da altura significativa de onda (H_s), Figura 5.3. Como era espectável, o Q aumenta com o aumento de H_s quer para um NMcte como NMvar. Importa notar que o Q começa a aumentar de forma significativa ($Q > 0,01$ l/s/m) para H_s superior a 3 m, sendo inferior a aproximadamente 0,05 l/s/m para valores de H_s inferiores a 3 m.

No caso do período de pico (T_p), Figura 5.4, apenas se começam a apresentar resultados relevantes de Q, $Q > 0,01$ l/s/m, para valores compreendidos entre os 11 s e os 23 s, sendo os maiores valores de Q, $Q > 800$ l/s/m, obtidos para T_p entre 20 s e 23 s. Contudo, para os maiores valores de T_p , entre os 24 s e os 30 s, $Q < 200$ l/s/m.

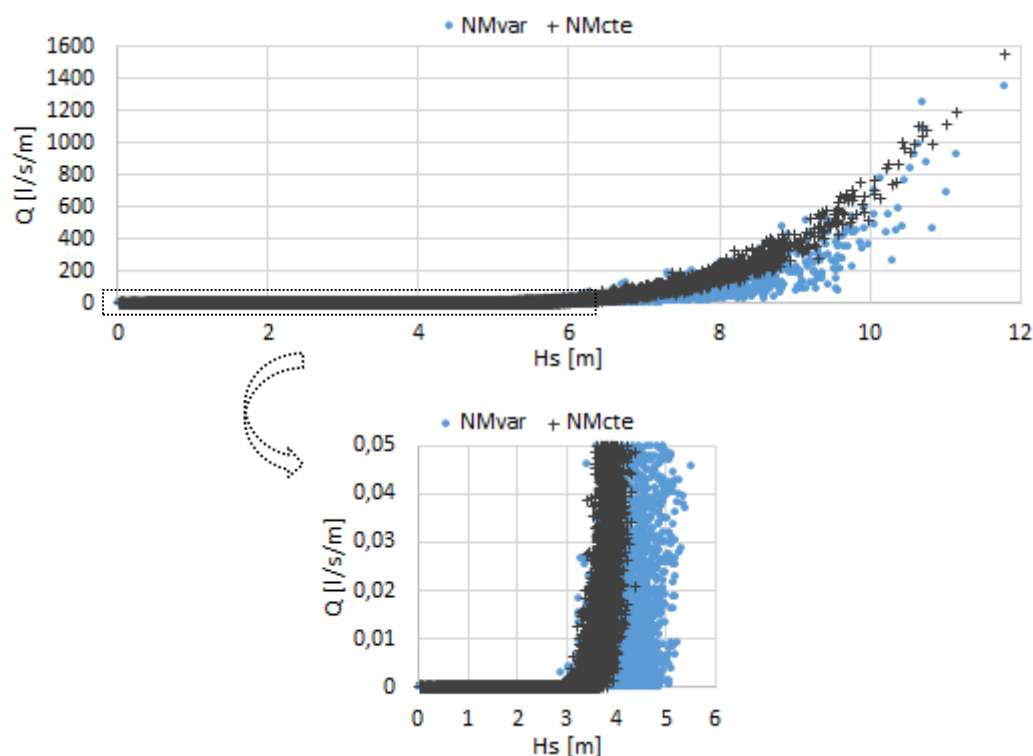


Figura 5.3- Q em função de H_s para NMcte e NMvar e para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

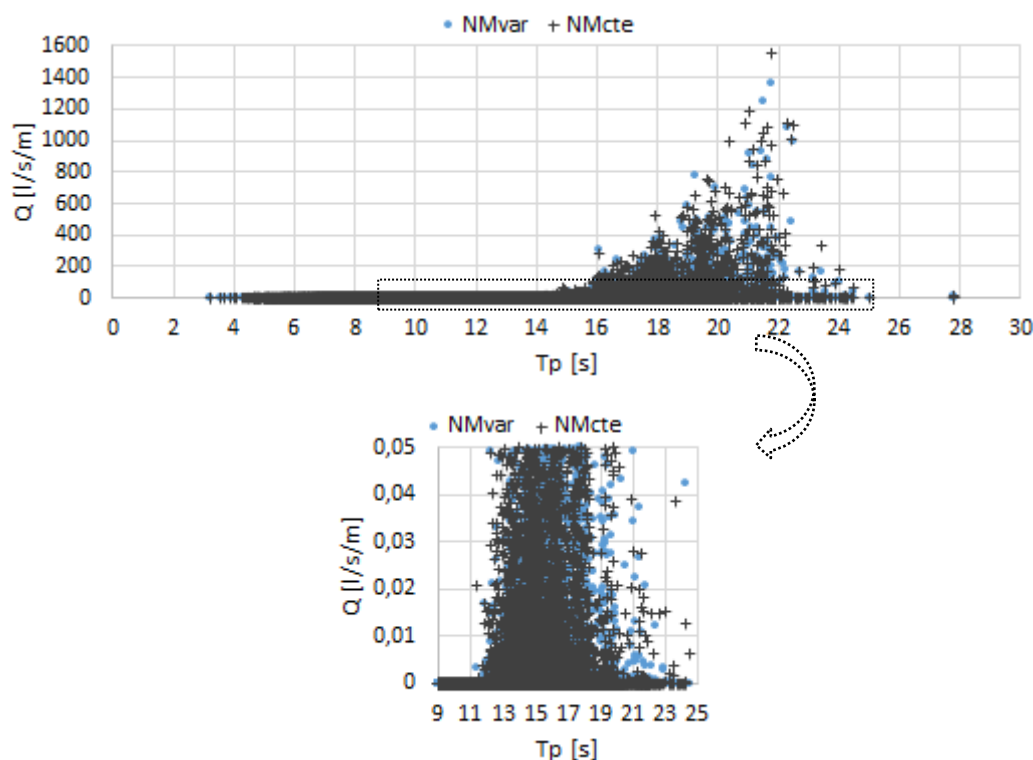


Figura 5.4- Q em função de T_p para NMcte e NMvar e para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

Feita a análise de Q em função dos parâmetros de agitação marítima H_s e T_p , torna-se fundamental perceber as diferenças de Q para cada evento de agitação marítima considerando níveis de mar

diferentes. Para tal, analisou-se a diferença, em valor absoluto, entre Q determinado para o NMvar e para o NMcte, $|\Delta Q| = |Q_{NMcte} - Q_{NMvar}|$, em função do número de eventos com Q compreendido nos intervalos que constam na Tabela 5.2 e na Tabela 5.6. Tendo por base os 13707 eventos de Q não nulo ($Q_{NMvar} \neq Q_{NMcte} \neq 0$) é possível verificar que as diferenças de Q, em valor absoluto, para as diferentes condições de nível de mar são maioritariamente abaixo de 1 l/s/m (aproximadamente 70%), sendo apenas 10% respeitantes ao intervalo de Q entre 10 e 100 l/s/m e de menos de 2% para $Q > 100$ l/s/m.

Tabela 5.2- Número de eventos por intervalo de diferença de Q (em valor absoluto) para as diferentes condições de nível de mar e para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

$|\Delta Q|$ (l/s/m)	Eventos
]0;0,01]	4356
[0,01;0,1]	2493
[0,1;1,0]	2730
[1,0;10,0]	2455
[10,0;100,0]	1431
>100	242
Total de eventos	13707

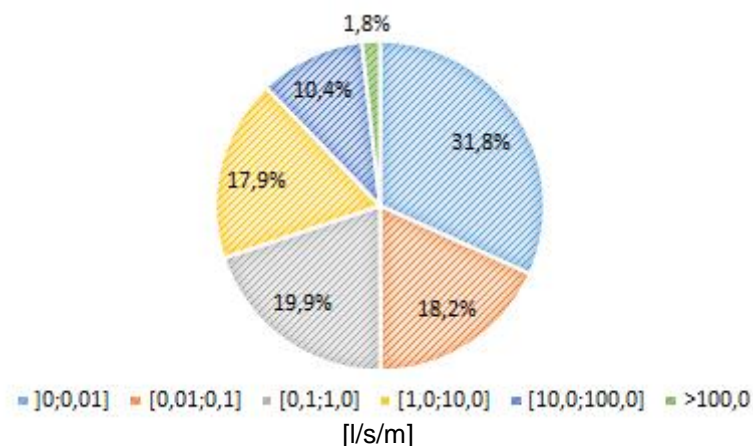


Figura 5.5- Percentagem de eventos por intervalo de diferença de Q para as diferentes condições de nível de mar e para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

Contudo, e apesar da grande maioria dos eventos apresentarem diferenças pequenas entre caudais galgados obtidos para os diferentes níveis de mar considerados, é necessário analisar a relevância dessas diferenças, ou seja, averiguar se às pequenas diferenças de Q estão associados caudais elevados ou baixos. Assim, analisou-se a diferença entre Q para NMcte e NMvar em função do Q para NMvar, sendo possível analisar se essa diferença é significativa dentro da gama de valores do Q apresentado (Q_{NMvar}). Os intervalos de Q_{NMvar} escolhidos estão associados aos valores limite de galgamento apresentados em 2.2.3, isto é, os limites associados à segurança de pessoas, veículos ou estruturas. Após cruzados os dados entre as diferenças e os caudais a que essas diferenças estão associadas apresenta-se na Tabela 5.3 a percentagem de eventos por intervalos de Q_{NMvar} e por intervalos de diferença de Q.

Relacionando os dados da Figura 5.5 com os dados da Tabela 5.3, é possível concluir que as baixas diferenças entre caudais calculados com NMcte e NMvar, $|\Delta Q| < 0,01$ l/s/m, estão na sua maioria, 31%, associadas a eventos com baixos caudais, $Q_{NMvar} < 0.01$ l/s/m. Verificam-se diferenças que podem ser relevantes (com elevada percentagem de eventos) mas pouco importantes na gama de Q que tem impacto no caso de estudo, isto é, se, por exemplo, estivermos a verificar a segurança de estruturas, cujo valor limite admissível é muito superior a essas diferenças. Efetivamente, em mais de 50% dos eventos analisados, as diferenças, $|\Delta Q|$, são inferiores a 1 l/s/m. De notar também a clara tendência para as maiores diferenças nas gamas de caudais estarem dentro da sua própria gama, como é o caso do intervalo $[0,05;0,4[$ (l/s/m) de Q_{NMvar} , que tem a sua maior percentagem de diferença associada ao intervalo $]0,1;1,0]$ (l/s/m) de $|\Delta Q|$.

Tabela 5.3- Percentagem de eventos por Q_{NMvar} associados à respetiva diferença, $|\Delta Q|$, para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

$|\Delta Q|$(l/s/m)	Q_{NMvar} (l/s/m)							
	<0,01	[0,01;0,05[	[0,05;0,4[	[0,4;1,0[	[1,0;10,0[	[10,0;50,0[	[50,0;200,0]	>200,0
[0,0;0,01]	30,6	0,9	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
[0,01;0,1]	13,7	2,2	1,8	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0
]0,1;1,0]	7,3	4,0	5,0	1,8	1,5	0,2	0,1	0,0
[1,0;10,0]	0,3	1,3	4,9	3,2	6,2	1,7	0,3	0,1
]10,0;100,0]	0,0	0,0	0,0	0,3	3,9	4,1	1,8	0,3
>100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,9	0,5

Apresenta-se nas Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9 o número de eventos por ano em que o Q superou os valores limite de segurança para veículos, pessoas, propriedades e estrutura de proteção, respetivamente. Optou-se por considerar os seguintes intervalos: $Q > 0,01$ l/s/m, limite associado ao valor mais baixo admissível para a segurança da circulação de veículos; $Q > 0,1$ l/s/m, limite associado ao valor mais baixo admissível para a segurança da circulação de pessoas; $Q > 0,4$ l/s/m, limite associado ao valor mais baixo para a segurança de propriedades existentes num raio de 5/10m da estrutura; e $Q > 200$ l/s/m, limite associado ao valor mais baixo para a segurança da estrutura de proteção.

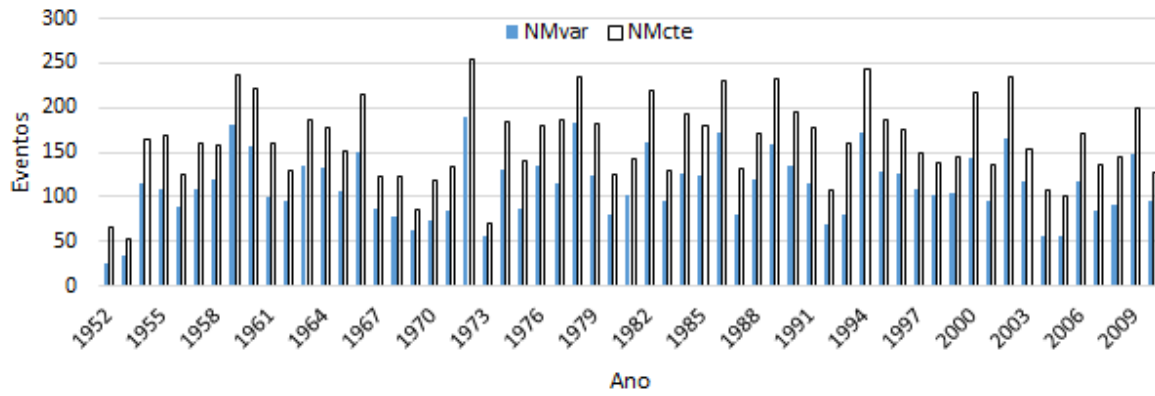


Figura 5.6- Número de eventos por ano com $Q > 0,01$ l/s/m para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

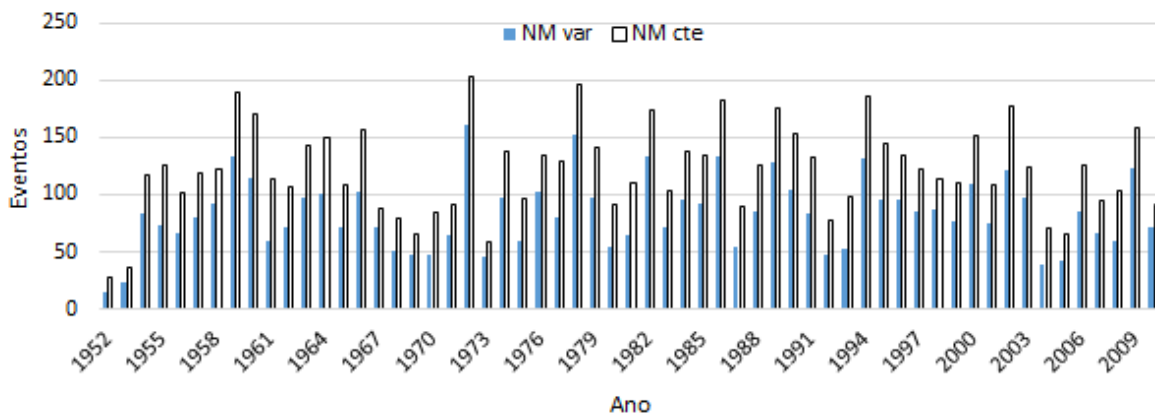


Figura 5.7- Número de eventos por ano com $Q > 0,1$ l/s/m para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

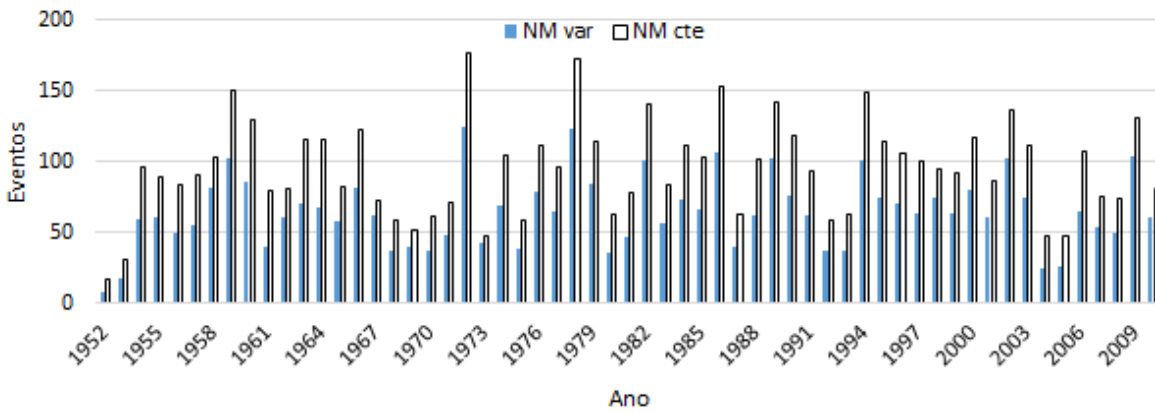


Figura 5.8- Número de eventos por ano com $Q > 0,4$ l/s/m para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

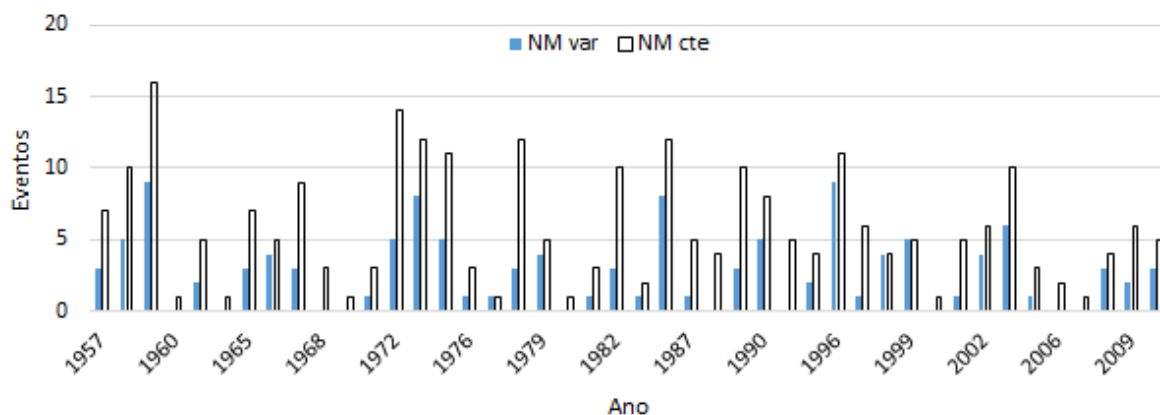


Figura 5.9- Número de eventos por ano com $Q > 200,0$ l/s/m para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

A Tabela 5.4 resume, em parte, os dados anteriormente apresentados, nomeadamente no que diz respeito ao número de eventos em que o Q ultrapassou os valores limite para a segurança da estrutura de proteção e da sua envolvente. É apresentado ainda o ano em que se observou o número máximo de eventos que ultrapassaram os valores limite admissíveis.

Tabela 5.4- Número de eventos registados em que o Q galgado ultrapassou os valores limite de segurança admissíveis para condições de agitação marítima à -14 m ZH.

[l/s/m]	Nº de eventos		Nº de eventos (máx./ano)	
	NMvar	NMcte	NMvar	NMcte
$Q > 0,01$	6588	9537	190 (1972)	254 (1972)
$Q > 0,1$	4926	7159	108 (1972)	151 (1972)
$Q > 0,4$	3795	5621	124 (1972)	177 (1972)
$Q > 200,0$	120	259	9 (1959/1996)	16 (1959)

Para os dados de agitação marítima na batimétrica -37 m ZH, em frente à estrutura em estudo, os resultados da análise de Q , baseada na mesma metodologia, são em todo semelhantes aos resultados encontrados na análise de Q para os dados de agitação marítima à profundidade de -14 m ZH. Assim, a partir dos 86200 eventos de agitação marítima obtidos a -37 m ZH, em 73643 obteve-se Q galgado nulo ($Q_{NMvar} \neq Q_{NMcte} \neq 0$), quer para a NMcte quer para NMvar. Dos 12557 eventos restantes, 93,8% dos caudais foram superiores para NMcte, (Figura 5.10), resultado bastante similar aos 94,1% exibidos na Figura 5.1.

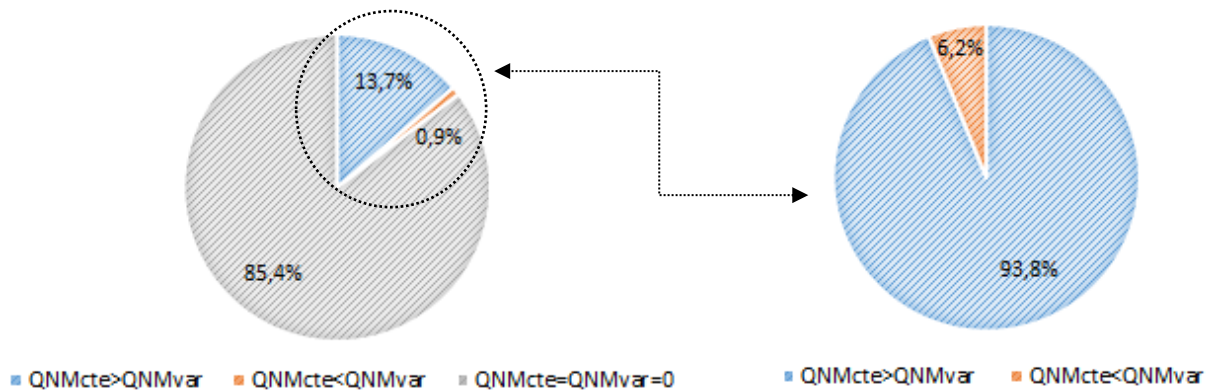


Figura 5.10- Condição de nível de mar em que se enquadram os maiores Q para condições de agitação marítima a -37 m ZH.

Relativamente à variação de Q em função dos parâmetros de agitação marítima, H_s , Dir , e T_p , a única diferença relevante a registar está no Q em função da direção. O Q determinado com base nos dados de agitação marítima a -37 m ZH tem valores relevantes ($Q > 0,01$ l/s/m) para o intervalo entre $230^\circ N$ e $330^\circ N$, mais amplo que o intervalo, entre $250^\circ N$ e $300^\circ N$, obtido para os dados de agitação marítima a -14 m ZH. Para valores de $Q > 200$ l/s/m as direções de agitação concentram-se no intervalo entre $260^\circ N$ e $320^\circ N$, igualmente mais amplo que do intervalo, entre $270^\circ N$ e $300^\circ N$, obtido para os dados de agitação a -14 m ZH.

No que diz respeito às diferenças entre caudais, os resultados também foram em tudo idênticos aos apresentados para os dados de agitação marítima a -14 m ZH, existindo apenas um pequeno aumento da percentagem de caudais associados ao nível de mar variável (33,2%) inseridos na gama de diferenças $|\Delta Q| =]0,0; 0,01]$ (l/s/m), o que não é relevante, pois o aumento está associado a valores abaixo dos valores limite e não tem impacto nem na segurança das estruturas nem na segurança das pessoas ou veículos.

Embora seja notório que é mais gravoso o Q galgado considerando o nível de mar constante (para o valor em causa) do que o nível de mar variável, optou-se por considerar apenas o nível de mar variável na avaliação da influência dos outros fatores, realizada nas secções seguintes, pois é a condição mais realista e a que reflete de forma mais precisa as condições a que a estrutura está sujeita. Para casos em que o nível do mar seja desconhecido, não deve ser descurada a hipótese de se assumir um nível de mar constante, pois, como é possível confirmar através dos resultados obtidos, se for assumido um nível do mar constante, neste caso, igual a 3,5m, os resultados estão do lado da segurança.

5.2. Influência da profundidade do local dos dados de agitação

Para o estudo da influência da profundidade do local dos dados de agitação na determinação do galgamento através da fórmula de Mase, considerou-se a série temporal de agitação marítima apresentada no capítulo 3 a duas profundidades distintas: -14 m ZH e -37 m ZH.

Na Tabela 5.5 apresentam-se os limites máximos e mínimos dos parâmetros de agitação marítima em função dos dados obtidos nas duas batimétricas em análise. De salientar que, embora a direção apresente um mínimo de $0,0^{\circ}\text{N}$, tendo em conta a orientação do alinhamento médio da linha de costa ($19,6^{\circ}\text{N}$), não existem direções no intervalo entre os $19,6^{\circ}\text{N}$ e os $199,6^{\circ}\text{N}$. Relativamente ao T_p , dado o facto de este se manter igual independentemente do local onde são medidos os dados de agitação, o mesmo não é apresentado.

Tabela 5.5- Valores limites dos parâmetros de agitação marítima obtidos em -14 m ZH e em -37 m ZH.

Parâmetros de agitação	-37 m ZH		-14 m ZH	
	min.	máx.	min.	máx.
Marítima				
Hs [m]	0,0	13,1	0	11,9
Dir [$^{\circ}\text{N}$]	0,0	360,0	0,0	359,6

A Figura 5.11 apresenta o número de eventos associados a diferentes classes de Hs para os dados obtidos à profundidade -14 m ZH e -37 m ZH. Como se pode observar, para -14 m ZH existem mais dados com $H_s < 1$ m que para -37 m ZH. Para $H_s > 1$ m ocorre o contrário, isto é, existem sempre mais eventos em cada classe para -37 m ZH.

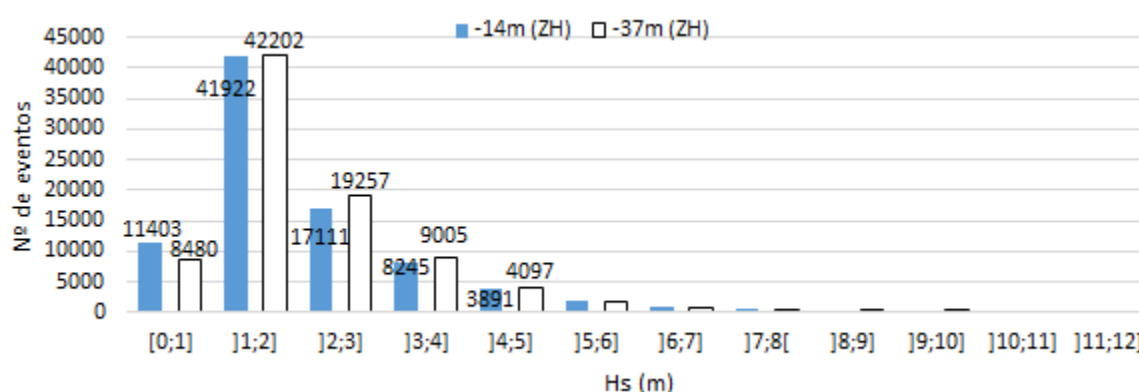


Figura 5.11- Número de eventos registados por intervalos de Hs.

Relativamente à diferença da direção da agitação obtida em cada uma das duas batimétricas, é possível verificar que ambas as profundidades apresentam o maior número de eventos para direções compreendidas entre 270°N e $337,5^{\circ}\text{N}$, mais precisamente, 82134 eventos para a profundidade -14 m ZH e 79737 para a profundidade de -37 m ZH, que representam respetivamente 95% e 93% do total de eventos associados a cada uma das séries, respetivamente. Tendo em conta a orientação da linha de costa ($19,6^{\circ}\text{N}$), não existem direções no intervalo entre os $19,6^{\circ}\text{N}$ e os $199,6^{\circ}\text{N}$, e como tal não foram representados na figura as classes correspondentes.

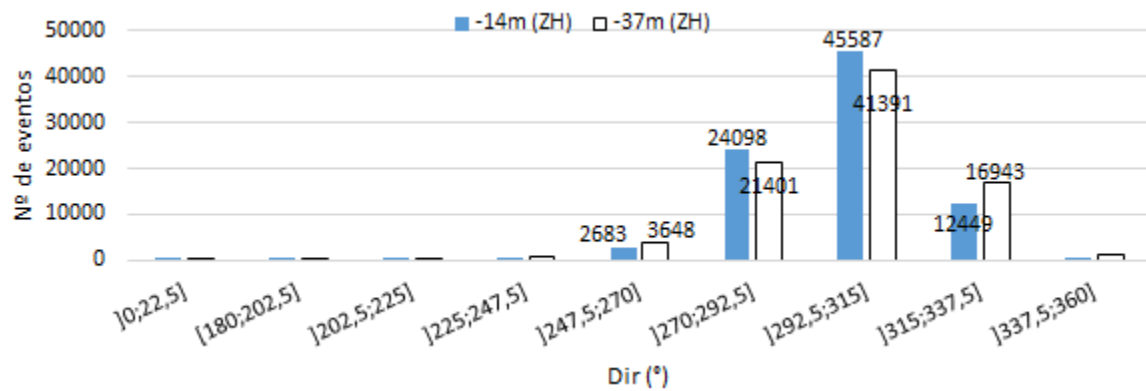


Figura 5.12- Número de eventos registados por intervalos de Dir.

No cálculo de Q utilizando a fórmula de Mase, a direção é considerada como constante e perpendicular à estrutura de proteção. No caso em estudo, a orientação da perpendicular à estrutura corresponde a $289,6^\circ\text{N}$, ou seja, na fórmula considera-se que a agitação apresenta uma direção incidente de $289,6^\circ\text{N}$. Assim, é fundamental analisar quanto é que os dados existentes estão afastados da condição de perpendicularidade assumida nesta fórmula. Desta forma, apresenta-se na Figura 5.13 a distribuição percentual de dados por classes de direção, para as batimétricas -14 m ZH e -37 m ZH. Na Figura 5.14 e na Tabela 5.6 apresenta-se a percentagem de dados com diferentes gamas de direções e o respetivo afastamento relativo à perpendicular à estrutura, para os dados obtidos a -14 m ZH. Como se pode verificar, o intervalo com a maior percentagem de eventos, 43%, é justamente o mais próximo da perpendicular à estrutura, isto é, $[280;300]^\circ\text{N}$, com uma diferença máxima de 10% relativa ao valor assumido na fórmula de Mase ($289,6^\circ\text{N}$).

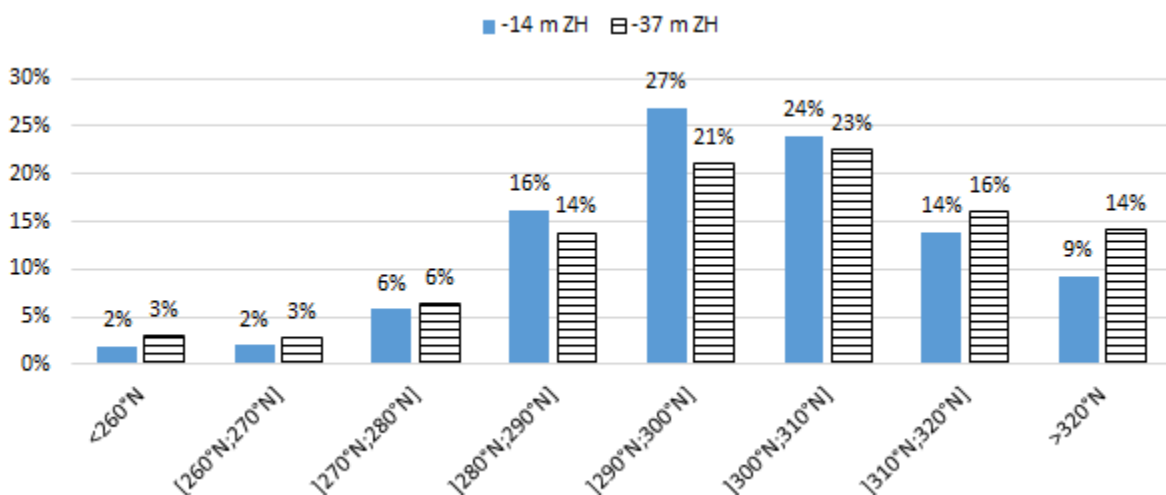


Figura 5.13- Percentagem de eventos associados a diferentes intervalos de direções de agitação para -14 m ZH e -37 m ZH.

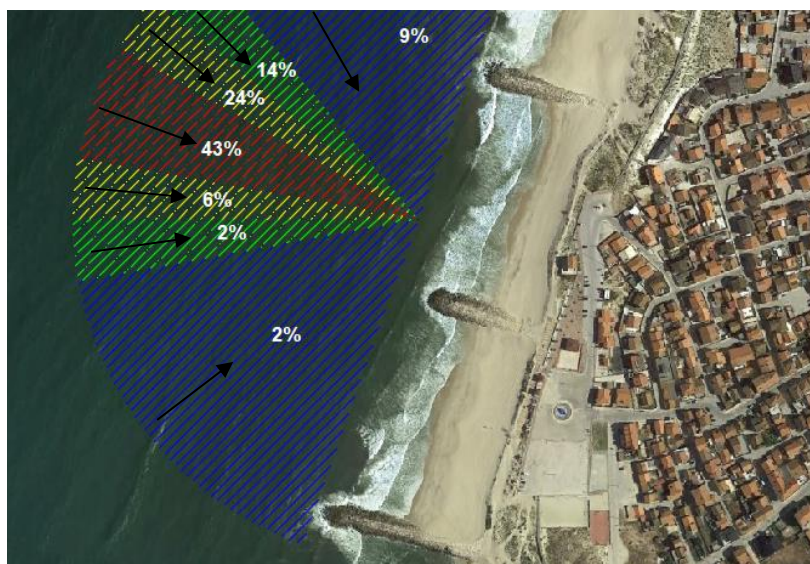


Figura 5.14- Percentagem de dados nas diferentes gamas de direções relativas à direção perpendicular à estrutura, para -14 m ZH.

Tabela 5.6- Diferença máxima entre a direção dos eventos e a direção perpendicular à estrutura para -14 m ZH.

Dir (°N)	DDirmáx	Eventos	%
<260	>30°	1656	2
[260;270]	[20°;30]	1758	2
[270;280]	[10°;20°]	5037	6
[280;290]	<10°	13960	43
[290;300]		23169	
[300;310]	[10°;20°]	20622	24
[310;320]	[20°;30°]	12015	14
>320	>30°	7983	9

Efetivamente, a maioria dos dados, 73% para -14 m ZH e 64% para -37 m ZH, inserem-se nos dois intervalos mais próximos da perpendicular à estrutura, isto é, [270;310] (°N). Esta diferença de 9% entre a percentagem de dados na classe [270;310] (°N) para -14 m ZH e -37 m ZH está certamente associada ao fenómeno da refração, que faz com que, à medida que as ondas se propagam para menores profundidades, a sua direção rode em direcção à perpendicular à linha de costa.

Relacionando agora as principais diferenças entre os dados de agitação obtidos nestas duas batimétricas, para valores de Q acima dos limites de segurança da estrutura, $Q > 0,01$ l/s/m, a direção de propagação da agitação (Dir), como esperado, apresenta uma gama mais estreita de direções na batimétrica dos -14 m ZH, Tabela 5.7, com variações superiores a 10° no caso da direção máxima e superiores a 30° no caso da direção mínima. As diferenças na gama de valores de H_s não são relevantes.

Tabela 5.7- Valores limites dos parâmetros de agitação marítima obtidos em -14 m ZH e em -37 m ZH para valores de $Q > 0,01$ l/s/m.

Parâmetros de agitação Marítima	-37 m ZH		-14 m ZH	
	min.	máx.	min.	máx.
Hs [m]	3,2	13,1	3,2	11,9
Dir [°N]	218,5	331,9	251,3	321,8

Analisando a variação dos valores de Q obtidos com a fórmula de Mase em função do local dos dados de agitação, verifica-se que os resultados obtidos são bastante próximos entre si. Dos 86200 eventos, em 13,8% registaram-se caudais não nulos em simultâneo, isto é, nos 86,2% dos eventos restantes obtiveram-se caudais nulos para o mesmo evento (mesmo dia e mesma hora), em -14 m ZH e em -37 m ZH. Na Figura 5.15 é possível verificar que, dos caudais não nulos, em 56% o Q obtido à profundidade de -37 m ZH é inferior ao obtido à -14 m ZH, e em 44% ocorre o contrário, não se vendo uma tendência clara de alteração com a profundidade dos dados.

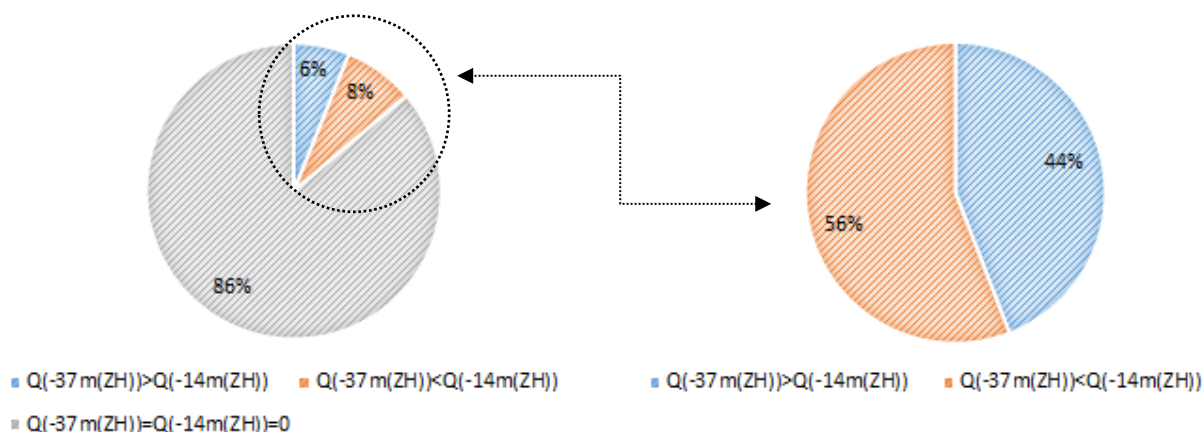


Figura 5.15- Q obtido através da fórmula de Mase com base em dados obtidos a -14 m ZH e a -37 m ZH.

Na Figura 5.16 apresenta-se o Q obtido através da fórmula de Mase com base nos dados obtidos a -14 m ZH e a -37 m ZH, onde é possível confirmar que não existe uma tendência clara da influência da alteração dos dados de agitação no Q galgado, ao contrário do que se verificou na Figura 5.1 e Figura 5.10 para a variação do nível de mar. Efetivamente, as diferenças de Q apresentadas são fruto de uma combinação dos três parâmetros introduzidos na fórmula, H_s , T_p e NM , não sendo possível verificar uma relação entre Q e a variação dos valores de H_s e T_p que ocorre entre os dados obtidos a diferentes profundidades.

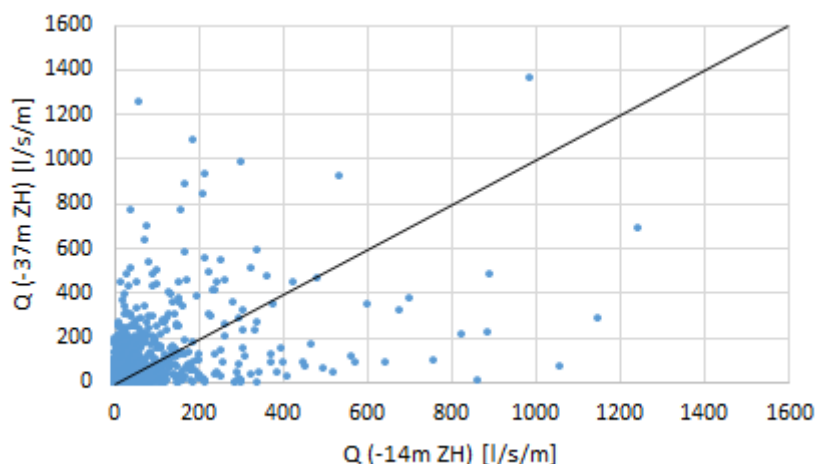


Figura 5.16- Q de galgamento para -14 m ZH versus Q de galgamento para -37 m ZH para NMvar.

Compararam-se ainda os valores de Q para ambas as séries calculando a diferença, em módulo, para cada evento. Mais concretamente calculou-se a diferença entre $Q(-14 \text{ m ZH})$ e $Q(-37 \text{ m ZH})$, $|\Delta Q|$, obtida para cada evento, isto é, mesmos dia e hora. Na Figura 5.17 são apresentadas as percentagens de eventos por intervalo de valores de $|\Delta Q|$. É de salientar que aproximadamente 70% dos eventos estão associados a diferenças inferiores a 1 l/s/m e que apenas se registam 12% com diferenças superiores a 100 l/s/m.

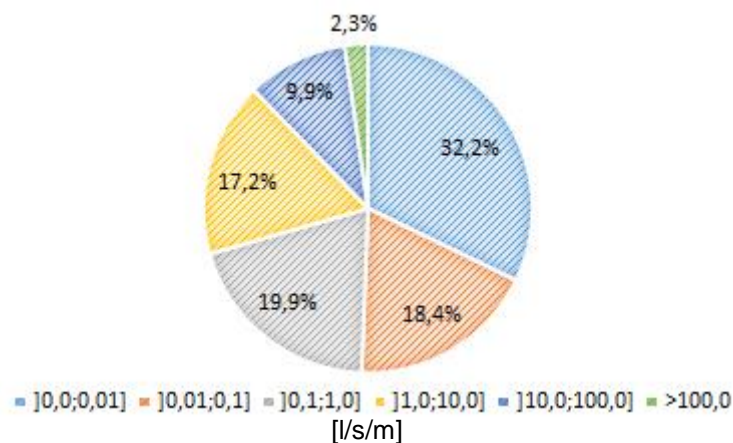


Figura 5.17-Percentagem dos eventos associados ao respetivo intervalo de $|\Delta Q|=|Q(-14 \text{ m ZH})-Q(-37 \text{ m ZH})|$

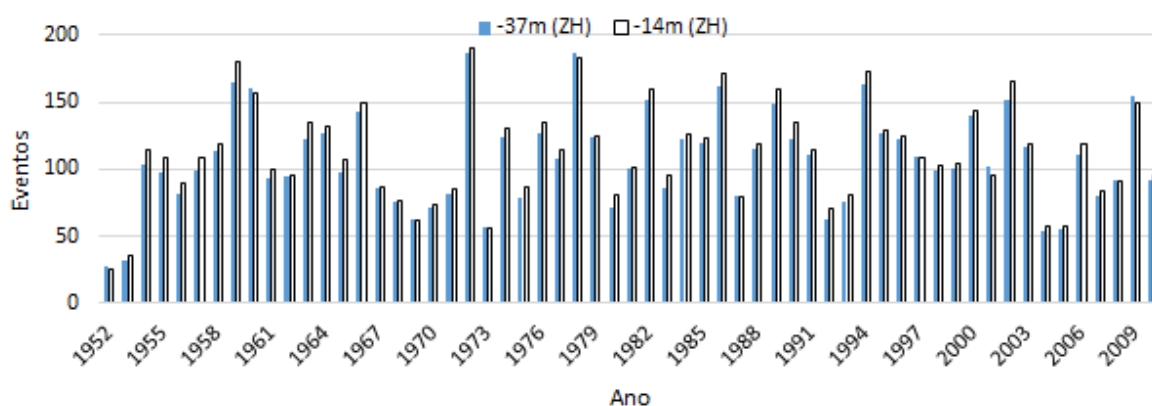
Embora, como referido, a maior percentagem dos resultados obtidos esteja associada a baixas diferenças, pretende-se analisar se essas diferenças estão associadas a baixos ou elevados caudais, pois se a um elevado Q estiver associada uma diferença baixa ela é irrelevante, mas se estiver associado um Q baixo a uma diferença elevada, já pode ser relevante. Assim, na Tabela 5.8 apresenta-se a percentagem de eventos associado a dada classe de $Q(-14 \text{ m ZH})$ e a dada classe de $|\Delta Q|$.

Tabela 5.8- Percentagem de eventos por classe de Q(-14 m ZH) e $|\Delta Q|$.

$|\Delta Q|$ (l/s/m)	Q(-14 m ZH) (l/s/m)							
	<0,01	[0,01;0,05[	[0,05;0,4[	[0,4;1,0[	[1,0;10,0[	[10,0;50,0[	[50,0;200,0]	>200,0
[0;0,01]	31,3	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
[0,01;0,1]	7,0	6,8	4,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
[0,1;1,0]	4,5	1,3	7,5	5,0	1,6	0,1	0,0	0,0
[1,0;10,0]	1,7	0,7	1,6	0,9	10,7	1,6	0,2	0,0
[10,0;100,0]	0,4	0,1	0,3	0,3	1,2	5,3	2,3	0,1
>100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	1,0	0,9

Analizadas as Figura 5.17 e a Tabela 5.8, verifica-se que a maior percentagem de eventos que ocorre na gama mais baixa de diferenças entre os caudais calculados a -14 m ZH e -37 m ZH, inferior a 0,01 l/s/m, ocorre para os valores mais baixos de Q (-14 m ZH) inferior a 0,01 l/s/m. Como já foi referido, e apesar de aos mais baixos caudais estarem associadas, na maioria, as mais baixas diferenças, o que não tem impacto na estrutura ou na sua envolvente, existem eventos com diferenças superiores a 100 l/s/m para caudais entre 50 e 200 l/s/m, o que pode ser relevante.

Finalmente, na Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.21 apresenta-se o número de eventos por ano em que se obteve um Q de galgamento acima dos valores admissíveis para a segurança da estrutura, veículos, pessoas e propriedades. Não é possível observar, para qualquer limite, uma diferença clara de eventos entre ambas as séries, isto é, entre a profundidade -14 m ZH e -37 m ZH, embora, em geral, se verifique um maior número de eventos por ano para -14 m ZH para todos os valores limites de caudais.

Figura 5.18- Número de eventos por ano com $Q > 0,01$ l/s/m

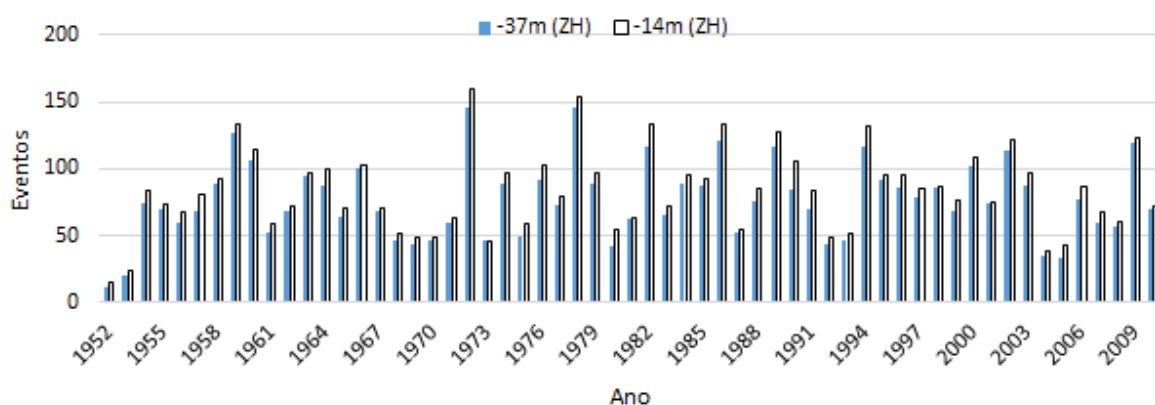


Figura 5.19- Número de eventos por ano com $Q > 0.1$ l/s/m.

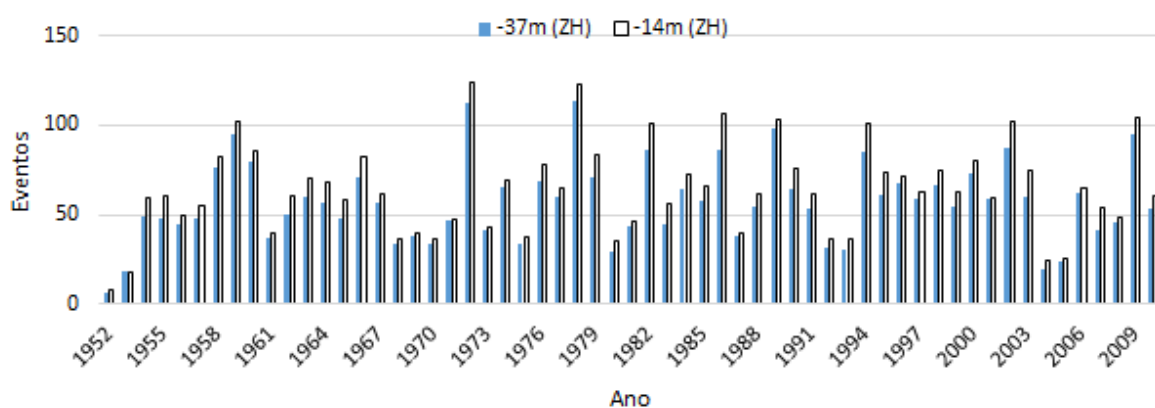


Figura 5.20- Número de eventos por ano com $Q > 0.4$ l/s/m.

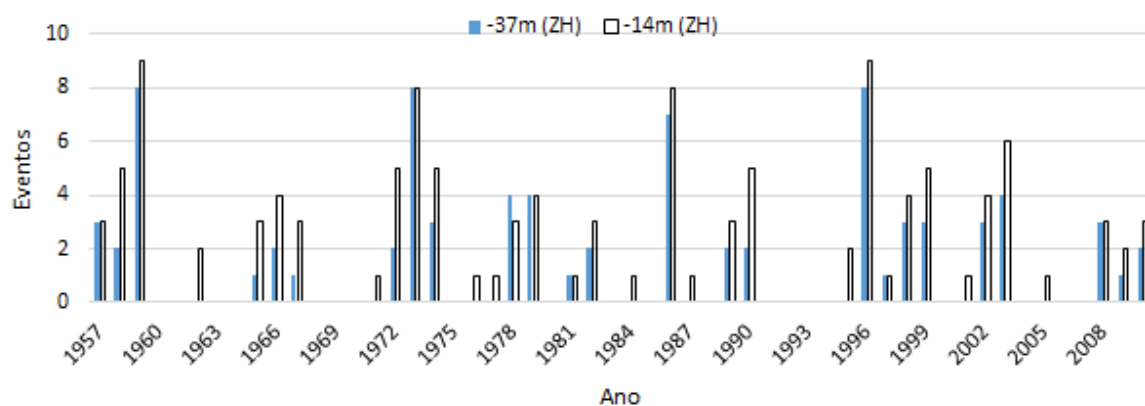


Figura 5.21- Número de eventos por ano com $Q > 200.0$ l/s/m

A Tabela 5.9 resume os dados anteriormente apresentados no que diz respeito ao número de eventos em que o Q ultrapassou os valores limite para a segurança da estrutura de proteção e da sua envolvente, para uma profundidade dos dados de agitação de -14 m ZH e -37 m ZH. É apresentado ainda o ano em que se observou o número máximo de eventos que ultrapassaram os valores limite admissíveis.

Tabela 5.9- Número de eventos registados em que o Q galgado ultrapassou os valores limite de segurança admissíveis para condições de agitação marítima a -14 m ZH.

[I/s/m]	Nº total de eventos		Nº de eventos (máx./ano)	
	-14m ZH	-37 m ZH	-14m ZH	-37 m ZH
Q>0,01	6588	6313	190 (1972)	186 (1972)
Q>0,1	4926	4512	160 (1972)	146 (1972)
Q>0,4	3795	3366	124 (1972)	114 (1972)
Q>200,0	120	80	9 (1959/1996)	14 (1959)

Com base nos resultados apresentados, quer os relativos à análise dos parâmetros da agitação marítima, quer os relativos à análise do número de eventos em que o Q ultrapassa os limites admissíveis para a segurança da estrutura e da envolvente por ela protegida, é possível concluir que Q é superior para o caso da agitação à profundidade de -14 m ZH. Para esta profundidade, -14 m ZH, as condições aproximam-se mais das condições de aplicação da fórmula relativamente à direção da agitação, já que para esta profundidade a agitação está mais concentrada na proximidade da perpendicular à estrutura.

5.3. Influência da variação do perfil transversal

Como já foi referido na seção 3.2.3, a zona arenosa do perfil transversal altera-se ao longo do ano e com o passar dos anos, não só devido às condições de agitação incidente, mas também devido às ações antrópicas, como a construção de obras marítimas, que influenciam os fundos adjacentes. Desta forma, foi necessário verificar a influência da alteração do perfil nos resultados do Q médio galgado sobre a estrutura de proteção marginal.

Estudou-se a influência no galgamento dos três perfis simplificados, baseados nos perfis observados em 1975, 1978 e 2011 (Figura 3.7 do capítulo 3) que se apresentam na Figura 5.22: o perfil esquemático baseado nos levantamentos topo-hidrográficos de 2011; o perfil esquemático baseado no levantamento topo-hidrográfico de 1978; e o perfil esquemático baseado nos levantamentos topo-hidrográfico de 1975.

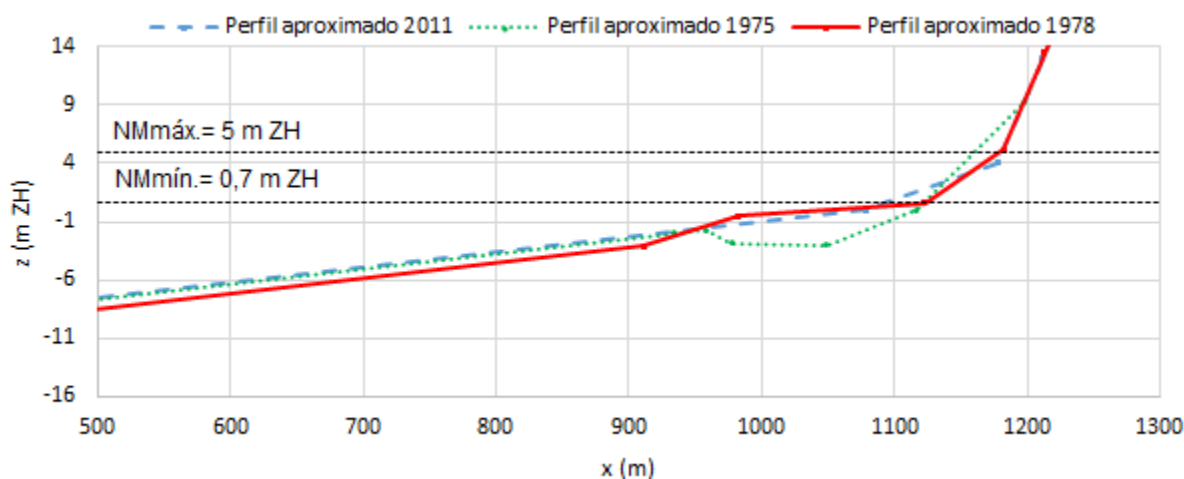


Figura 5.22- Perfis transversais esquematizados baseados nos perfis medidos em 1975, 1978 e 2011 (PB).

É importante salientar as diferenças entre perfis que podem influenciar o galgamento. Abaixo do nível de mar mínimo no período em análise, $NM_{mín.}$, é possível verificar diferenças significativas entre o perfil aproximado de 2011, também designado como perfil base, e o perfil aproximado de 1975. Essas diferenças podem influenciar a zona de rebentação da agitação. Relativamente ao perfil aproximado de 1978 e o perfil base, estes são muito próximos para um NM abaixo do $NM_{mín.}$, não sendo por isso expectáveis grandes diferenças na rebentação das ondas. Na zona compreendida entre o $NM_{mín.}$ e o nível de mar máximo no período em análise, $NM_{máx.}$, zona onde se dá, em muitos casos, o espraçamento, o perfil aproximado de 1975 apresenta um declive maior, que pode levar a um maior espraçamento e, conseqüentemente, um maior galgamento da estrutura. Para valores próximos e acima do $NM_{máx.}$ o perfil base e o perfil aproximado de 1978 apresentam um declive superior ao perfil aproximado de 1975, tornando estes dois perfis mais condicionantes no que ao valor do galgamento dizem respeito.

Para cada um dos três perfis, doravante designados por perfis de 1975, 1978 e perfil base, calculou-se Q com a fórmula de Mase considerando as condições de agitação a -14 m ZH e o nível de mar variável. Analisaram-se os eventos com Q não nulo de forma a perceber as características do perfil que tornam o galgamento mais gravoso. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.23 onde se apresenta Q obtido com os perfis de 1975 e 1978 versus Q obtido com o perfil base. Como se pode observar, as alterações no perfil não tiveram uma influência significativa em Q , que apresenta diferenças médias inferiores a 2%, não sendo possível observar uma tendência clara de variação associada a um perfil específico. No entanto, para os maiores caudais ($Q > 400$ l/s/m), o perfil de 1975 apresenta caudais inferiores ao perfil base e o de 1978 caudais superiores a este.

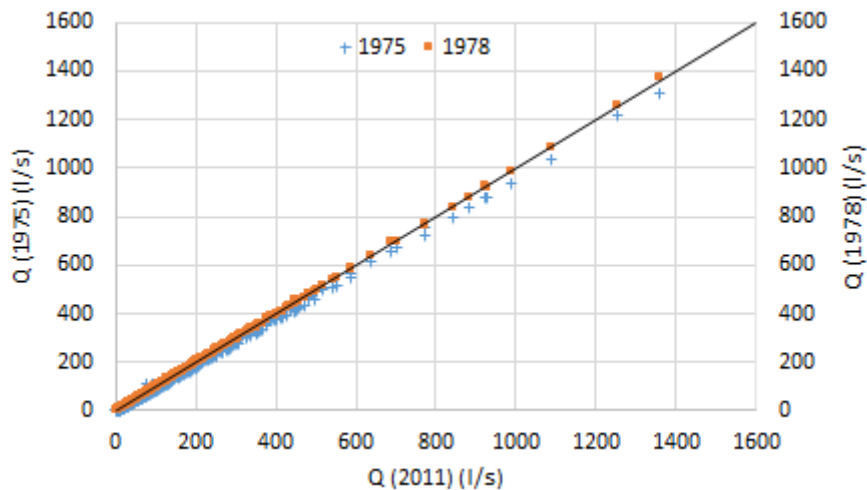


Figura 5.23-Q para os perfis de 1975 e 1978 em função do Q para o perfil de 2011

Comparando o Q para o perfil base com o Q para o perfil de 1975, dos 86200 dados de *hindcast*, em 76621 (88,9%) verificaram-se caudais galgados nulos e iguais entre si para ambas as séries ($Q(PB)=Q(1975)=0$). Em 2912 eventos (3,4%) verificaram-se caudais não nulos e iguais entre si ($Q(PB)=Q(1975)\neq 0$) e em 6667 (7,7%) verificaram-se, para o mesmo evento (hora e dia), caudais não nulos e diferentes entre si. Analisando os resultados com $Q>0,0$ l/s/m, Figura 5.24 em particular nos 7,7% de eventos em se verificaram valores de Q diferentes entre perfis, numa percentagem significativa (99,7%) os resultados obtidos no perfil base são superiores aos do perfil de 1975, $Q(PB)>Q(1975)$, obtendo-se apenas 23 eventos com Q superior para o perfil de 1975, indicando que o fenómeno do galgamento é, em geral, mais gravoso para o perfil base do que para o perfil resultante da campanha topo-hidrográfica de 1975.

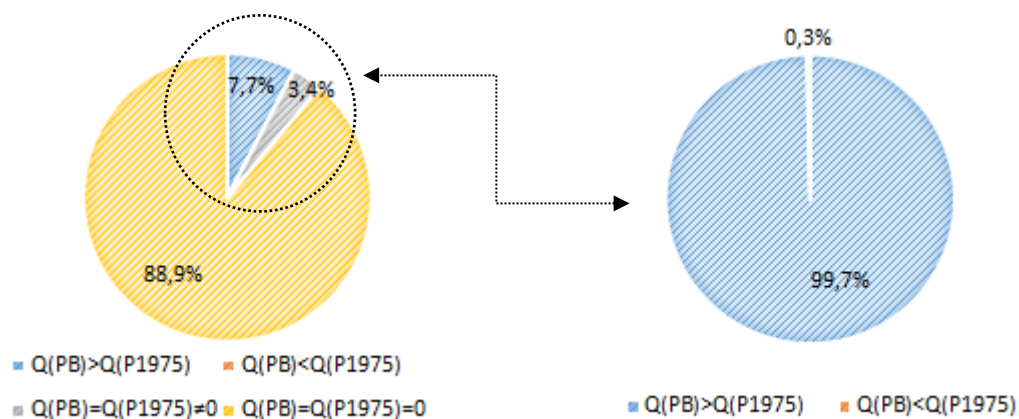


Figura 5.24- Comparação do Q obtido através da fórmula de Mase para o perfil base e para o perfil de 1975.

É importante ainda verificar quais as diferenças entre caudais calculados para o mesmo registo (dia e hora), ΔQ , alterando apenas o perfil em análise e a que valores de Q estão associadas essas diferenças. Nas Tabela 5.10 e Figura 5.25 apresentam-se as diferenças de Q calculadas com o perfil

base e com o perfil de 1975. Na Tabela 5.11 apresenta-se ainda $|\Delta Q|$ para cada classe de valores de $Q(PB)$.

Tabela 5.10- Diferença de caudais (valor absoluto) para os diferentes perfis e número de eventos associados ao respetivo intervalo.

$|\Delta Q|$ (l/s/m)	Eventos
]0;0,01]	3988
[0,01;0,1]	1024
[0,1;1,0]	793
[1,0;10,0]	668
[10,0;100,0]	194
>100	0
Total de eventos	6667

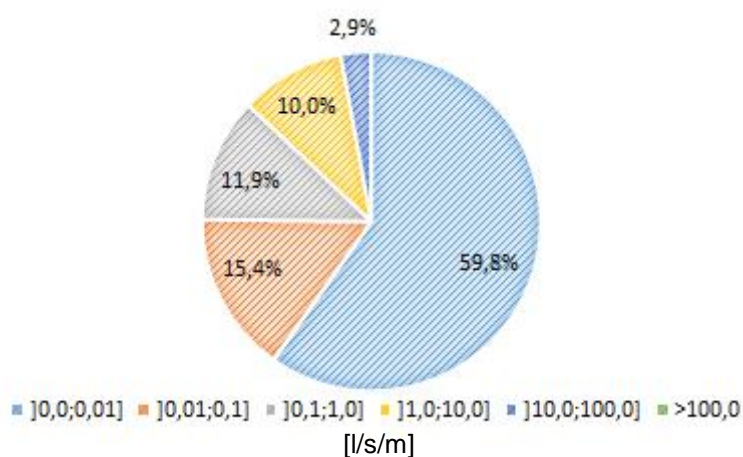


Figura 5.25- Percentagem dos eventos associados ao respetivo intervalo de $|\Delta Q| = Q(1975) - Q(PB)$

Tabela 5.11- Relação entre a diferença entre $Q(PB)$ e $Q(1975)$, $|\Delta Q|$, e $Q(PB)$.

$|\Delta Q|$ (l/s/m)	$Q(PB)$ (l/s/m)							
	<0,01	[0,01;0,05]	[0,05;0,4]	[0,4;1,0]	[1,0;10,0]	[10,0;50,0]	[50;200]	>200
]0;0,01]	7,6	11,8	19,4	7,8	12,7	0,5	0,0	0,0
[0,01;0,1]	0,0	0,4	3,8	2,4	3,7	4,6	0,5	0,0
[0,1;1,0]	0,0	0,0	0,1	1,2	6,8	2,7	1,1	0,0
[1,0;10,0]	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	5,4	3,1	0,4
[10,0;100,0]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	1,4
>100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Analisando os resultados acima, é possível verificar que em aproximadamente 59,8% dos eventos com $Q(PB) \neq Q(1975) \neq 0$ as diferenças são pequenas, compreendidas no intervalo $]0;0,01]$ (l/s/m), e que destes, 67% tem o Q do perfil base compreendido entre 0,05 l/s/m e 10 l/s/m, o que torna essas diferenças pouco significativas. Nas restantes gamas de valores de $|\Delta Q|$, também a maioria dos eventos

tem caudais superiores à gama dos erros. As maiores diferenças obtidas foram inferiores a 100 l/s/m e ocorreram para caudais do perfil base superiores a 50 l/s/m.

A análise das diferenças entre os caudais calculados com o perfil de 1978 e o perfil base, e entre o de 1975 e o perfil base, são em tudo semelhantes. Dos resultados obtidos, a única diferença a registar reside no número de vezes em que $Q(PB) \neq Q(1978) \neq 0$ e na gama de diferenças onde se insere o maior número de eventos. Para o perfil de 1978, apenas 4964 eventos (11,1%) se verificaram como não nulos, e nestes, o perfil base apresenta resultados de Q inferiores aos obtidos com o perfil de 1978 em 79,8% dos eventos, Figura 5.26. Na Tabela 5.13, ao contrário do que ocorria com os resultados obtidos para o perfil de 1975, é possível verificar que, em aproximadamente 84% dos eventos com $Q(PB) \neq Q(1978) \neq 0$, as diferenças são pequenas, compreendidas no intervalo $]0,0;0,01]$ (l/s/m), e que a maior percentagem de eventos (29,8%) nesta classe de valores de $|\Delta Q|$ tem o Q para o perfil base compreendido entre 1,0 l/s/m e 10 l/s/m, o que torna essas diferenças pouco significativas no que respeita aos limites admissíveis de Q para estruturas de proteção, mas significativo, por exemplo, para a segurança de pessoas. Nota ainda para os 20,9% de eventos em que se verificaram caudais do perfil base compreendidos entre os 0,05 l/s/m e os 0,4 l/s/m em que as diferenças máximas não excederam 0,01 l/s/m. Embora uma diferença de 0,01 l/s/m num Q de 0,4 l/s/m não seja tão significativa, essa diferença não deve ser ignorada para um Q de 0,05 l/s/m, o que ocorre em 3,5% dos eventos não nulos. As maiores diferenças obtidas foram inferiores a 10 l/s/m e ocorreram apenas para caudais do perfil base superiores a 50 l/s/m.

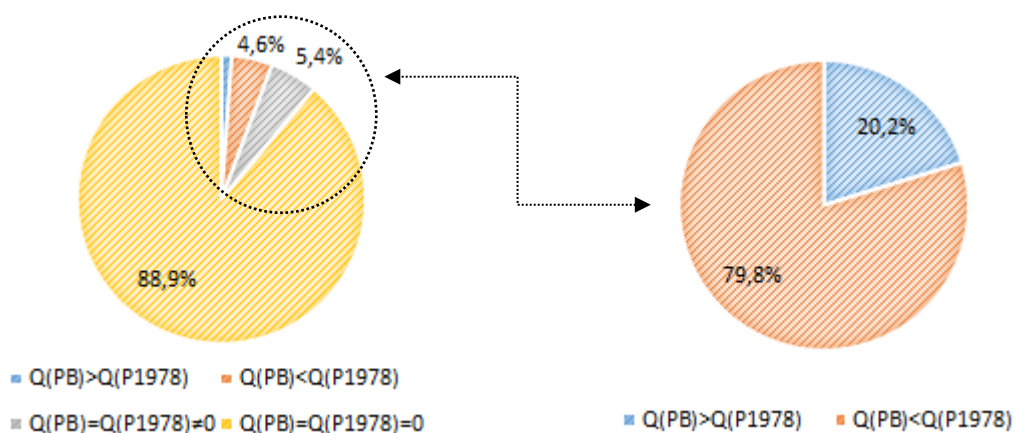


Figura 5.26- Comparação do Q obtido através da fórmula de Mase para o perfil base e para o perfil associado aos levantamentos topo-hidrográficos de 1978.

Tabela 5.12- Diferença de caudais (valor absoluto) para os perfis base e de 1978 e número de eventos associados ao respetivo intervalo.

$|\Delta Q| (l/s/m)$	Eventos
]0;0,01]	4185
[0,01;0,1]	315
[0,1;1,0]	288
[1,0;10,0]	174
[10,0;100,0]	2
>100	0
Total de eventos	4964

Tabela 5.13- Relação entre a diferença entre $Q(PB)$ e $Q(1978)$, $|\Delta Q|$, e $Q(PB)$.

	Q (PB) (l/s/m)							
|ΔQ| (l/s/m)	<0,01	[0,01;0,05[	[0,05;0,4[	[0,4;1,0[	[1,0;10,0[	[10,0;50,0[	[50;200]	>200
]0;0,01]	1,3	3,5	20,9	13,8	29,8	13,0	2,0	0,0
]0,01;0,1]	0,0	0,0	0,1	0,2	1,0	0,9	3,3	0,8
]0,1;1,0]	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	3,3	1,1	0,3
]1,0;10,0]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,9	1,1
]10,0;100,0]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
>100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

No que se refere ao número de eventos por ano em que se obteve um Q acima dos valores admissíveis para a segurança da estrutura, de veículos, pessoas, propriedades e da própria estrutura, a Tabela 5.14 apresenta um resumo do número total de eventos ocorridos entre os anos de 1952 e 2010. Como era expectável, dada a análise feita anteriormente, o perfil onde se pode observar o menor número de eventos em todas as classes é o perfil de 1975; no entanto a diferença não é significativa para o perfil de 1978 nem para o perfil base, com a variação no número de eventos por ano a ser de 42 eventos no máximo. O perfil de 1978 e o perfil base apresentam praticamente o mesmo número de eventos. O mesmo ocorre relativamente ao número máximo de eventos por ano em cada gama de valores de Q, não se verificando qualquer alteração significativa.

Tabela 5.14- Número de eventos em que o Q ultrapassou os valores limite de segurança admissíveis para os perfis de 1975, 1988 e perfil base.

[l/s/m]	Nº total de eventos			Nº de eventos (máx./ano)		
	P1975	P1978	PB	P1975	P1978	PB
Q>0,01	6575	6589	6588	190 (1972)	190 (1972)	190 (1972)
Q>0,1	4892	4926	4926	159 (1972)	160 (1972)	160 (1972)
Q>0,4	3752	3794	3795	122 (1972)	124 (1972)	124 (1972)
Q>200,0	108	119	120	9 (1959)	9 (1959)	9 (1959/1996)

Da comparação entre os caudais médios galgados calculados com os três perfis, é possível concluir que a influência da alteração do perfil transversal no Q sobre a estrutura de proteção é reduzida sendo, no entanto, ligeiramente superior no perfil base relativamente ao perfil de 1975. O perfil base e o perfil de 1978 apresentam resultados muito semelhantes.

5.4. Influência da subida do nível médio do mar devida às alterações climáticas

Como já foi referido no Capítulo 1, as principais consequências esperadas das alterações climáticas no litoral de Portugal Continental são a subida do nível médio do mar e a alteração do regime de agitação marítima, mais concretamente a alteração da direção de propagação das ondas [1]. Nesta dissertação estuda-se apenas a influência da subida do nível médio do mar pois considera-se ser a alteração climática com maior impacte no galgamento de estruturas de proteção marginal, sendo que a alteração do regime de agitação afeta de uma forma mais veemente a componente erosiva das zonas costeiras. Além disso, a alteração da direção não é tida em conta no cálculo do galgamento com a fórmula utilizada nesta dissertação.

Assim, nesta última secção de análise de resultados, é analisada a influência da subida do nível do mar no caudal de galgamento sobre a estrutura. As alterações climáticas, mais precisamente a subida do nível médio do mar, NMM, resultante dessas mesmas alterações, pode ter influência na agitação marítima e no Q sobre as estruturas costeiras. Para o caso de estudo foram adotados dois valores para o aumento do NMM: um mais otimista, correspondente a um aumento do NMM de 2,5 mm/ano, e um mais extremo, de 5,0 mm/ano.

Assim, passa a analisar-se de que forma Q varia com o aumento do NMM. Verificaram-se as diferenças existentes entre caudais do mesmo registo, dia e hora, calculados com o nível do mar actual, QNMvar, e considerando a subida de 2,5 mm/ano e de 5 mm/ano, QNMvar+2,5mm/ano e QNMvar+5mm/ano respetivamente. Foram analisadas as diferenças superiores a 100%, 50% e 20% tanto para um aumento de 2,5 mm/ano como para um aumento de 5,0mm/ano. Nas Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29, é possível observar para que caudais se observam as respetivas diferenças.

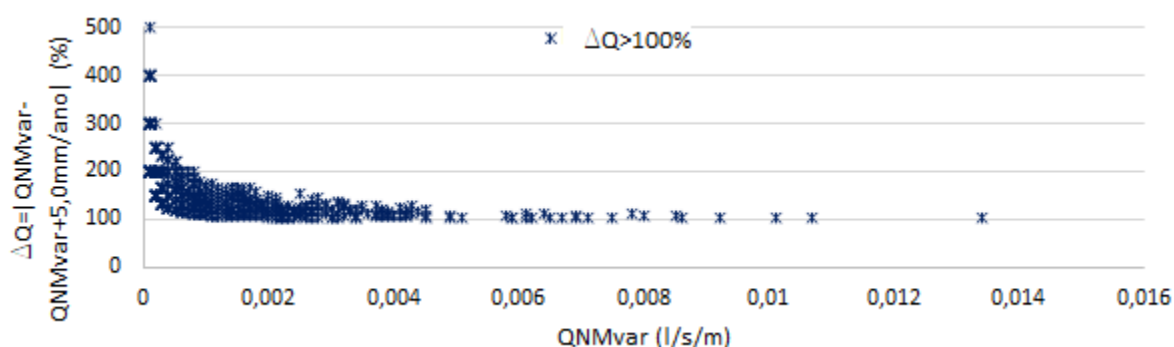


Figura 5.27- Diferenças entre QNMvar e QNMvar+5,0mm/ano superiores a 100% em função QNMvar

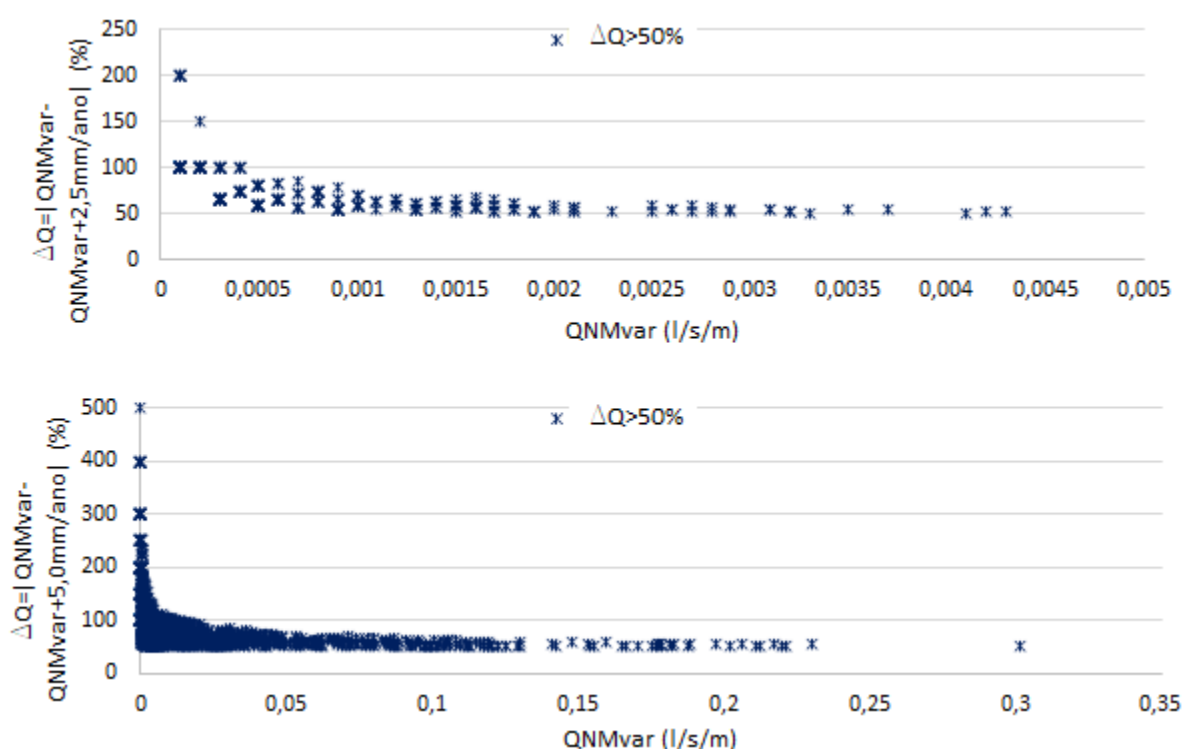


Figura 5.28- Diferenças entre QNMvar e QNMvar+2,5mm/ano (em cima), e QNMvar+5,0mm/ano (em baixo) superiores a 50% em função do QNMvar.

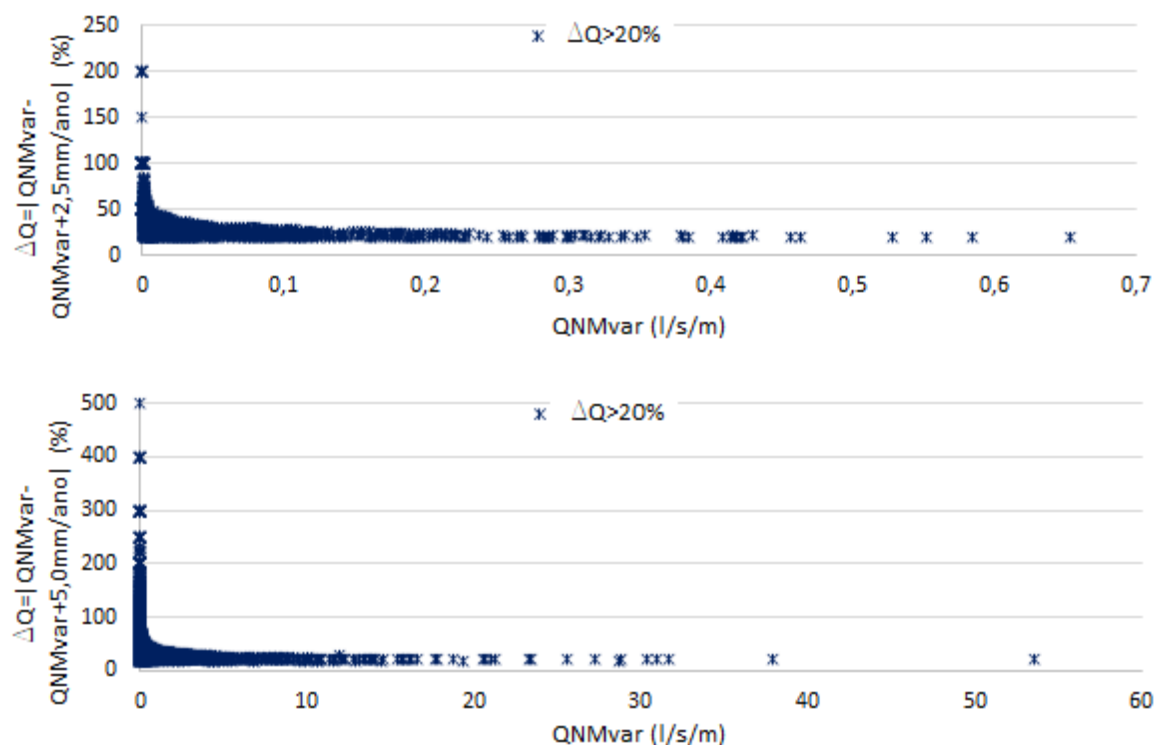


Figura 5.29- Diferenças entre QNMvar e QNMvar+2,5mm/ano (em cima), e QNMvar+5,0mm/ano (em baixo) superiores a 20% em função QNMvar.

As diferenças mais significativas, isto é, superiores a 50% e 100% (Figura 5.27 e Figura 5.28), têm relevância apenas para uma situação de aumento 5,0mm/ano com $\Delta Q > 50\%$, tendo-se obtido 554 eventos com $Q > 0,01$ l/s/m, que colocam em causa a segurança à circulação de veículos e pessoas. Os casos de $\Delta Q > 100\%$ e aumento do NMM de 5,0mm/ano e de $\Delta Q > 50\%$ e aumento do NMM de 2,5mm/ano apenas se fazem sentir para valores de $Q < 0,01$ l/s/m, que não tem qualquer impacto negativo na estrutura de proteção. De notar ainda que não se obtiveram $\Delta Q > 100\%$ para um aumento do NMM 2,5mm/ano.

As diferenças que se revelaram mais condicionantes foram as $\Delta Q > 20\%$ para um aumento do NMM de 5,0mm/ano, pois são as diferenças associadas a valores de Q que ultrapassam três dos quatro limites de segurança da estrutura ao galgamento, $Q > 0,01$ l/s/m, $Q > 0,1$ l/s/m e $Q > 0,4$ l/s/m, respetivamente os limites de segurança associados à circulação de veículos, pessoas e propriedades no tardoz da estrutura de proteção, apresentando um valor máximo de 53,5 l/s/m, como é possível observar na Figura 5.29. Para $Q > 200$ l/s/m o aumento do NMM apenas se reflete em $\Delta Q < 10\%$.

Na Tabela 5.15 são apresentadas as gamas de valores dos parâmetros de agitação associados aos caudais com o nível de mar variável suscetíveis aos aumentos de Q superiores a 20%, $\Delta Q > 20\%$, como consequência do aumento do NMM de 2,5 mm/ano e de 5,0 mm/ano. É possível afirmar através da Tabela 5.15 que, para $Q < 1,0$ l/s/m os valores de H_s mais suscetível à existência de galgamento situam-se no intervalo [3,3;5,8] m para o caso de uma subida do nível do mar de 2,5mm/ano e [3,3;6,4] m para o caso de uma subida do nível do mar de 5,0mm/ano. De notar que os valores máximos de H_s aumentam com a subida do nível do mar. Relativamente à Dir, esta apresenta valores suscetíveis à ocorrência de galgamento no intervalo [257,3;321,0] ($^{\circ}$ N) para $Q < 1,0$ l/s/m e uma subida do nível médio do mar de 2,5mm/ano, e para uma subida do nível médio do mar de 5,0mm/ano valores no intervalo [251,3 ;321,8] ($^{\circ}$ N). Para valores de galgamento compreendidos no intervalo [1,0;100,0] (l/s/m) a Dir toma valores mais próximos da perpendicularidade com a estrutura ($289,6^{\circ}$ N) e apresenta ainda valores suscetíveis à existência de galgamento para o intervalo [264,4;305,2] ($^{\circ}$ N). No caso do T_p , este apresenta valores suscetíveis à existência de galgamento para $Q < 1,0$ l/s/m no intervalo [12,6; 21,8] (s) no caso de uma subida do nível médio do mar de 2,5mm/ano e [12,3;24,5] (s) para uma subida do nível médio do mar de 5,0mm/ano. Para valores de galgamento compreendidos entre [1,0;100,0] (l/s/m), T_p apresenta valores no intervalo [13,6;24,2] (s).

Tabela 5.15- Gamas dos parâmetros de agitação associados ao aumento de galgamento devido ao aumento do NMM de 2,5 mm/ano e de 5mm/ano, com $\Delta Q > 20\%$.

QNMvar [l/s/m]	Hs [min;máx] [m]		Dir [min;máx] [°N]		Tp [min;máx] [s]	
	+2,5mm	+5,0mm	+2,5mm	+5,0mm	+2,5mm	+5,0mm
[0,01;0,1]	[3,3;5,4]	[3,3;5,7]	[257,3;316,6]	[251,3;316,6]	[12,6;21,8]	[12,3;24,5]
]0,1;1,0]	[3,8;5,8]	[3,6;6,4]	[256,2;321,0]	[256,2;321,8]	[11,1;21,1]	[11,1;24,3]
]1,0;10,0]	-	[4,3;7,0]	-	[264,4;311,7]	-	[13,6;24,2]
]10,0;100]	-	[5,5;8,3]	-	[267,0;305,2]		[14,9;21,4]
>100	-	-	-	-	-	-

Analisadas as diferenças entre os caudais resultantes de um possível aumento do NMM, é agora necessário analisar de que forma esse aumento influencia o número de eventos de galgamento ocorridos por ano. Como seria expectável, com os respetivos aumentos do NMM o Q para NMvar+2,5mm/ano e NMvar+5,0mm/ano aumentou em 100% dos 86200 eventos respeitantes ao período 1952-2010 para NMvar. Nas Tabela 5.16 e Figura 5.30 apresenta-se o número de eventos em que Q foi superior aos valores limite de segurança da estrutura para veículos ($Q > 0,01$ l/s/m), pessoas ($Q > 0,1$ l/s/m), propriedades ($Q > 0,4$ l/s/m) e para a própria estrutura de proteção ($Q > 200,0$ l/s/m) para um aumento de NMM de 2,5mm/ano e 5,0mm/ano.

De acordo com a Tabela 5.16 e com a Figura 5.30 torna-se claro o aumento do número de eventos por ano e do máximo número de eventos obtidos no mesmo ano para $Q < 200,0$ l/s/m. Para $Q > 200,0$ l/s/m o máximo número de eventos obtidos no mesmo ano mantém-se com a subida do nível do mar, tendo ocorrido apenas aumentos para o número total dos eventos contabilizando todos os anos 1952-2010. De referir que os aumentos, em relação ao nível de referência (NMvar) se dão na ordem dos 2% para o caso de uma subida do nível médio do mar de 2,5mm/ano e de 4% para uma subida do nível médio do mar de 5,0mm/ano.

Tabela 5.16- Número de eventos em que Q ultrapassou os valores limite de segurança admissíveis para um aumento do NMM de 2,5mm/ano e 5,0mm/ano.

[l/s/m]	Nº de eventos/ano			Nº de eventos máx/ano		
	NMvar	NMvar+2,5mm	NMvar+5,0mm	NMvar	NMvar+2,5mm	NMvar+5,0mm
Q>0,01	6588	6725	6860	190 (1972)	193 (1972)	196 (1972)
Q>0,1	4926	5022	5127	160 (1972)	160 (1972)	162 (1972)
Q>0,4	3795	3864	3958	124 (1972)	127 (1972)	128 (1972)
Q>200,0	120	127	133	9 (1972)	9 (1972)	9 (1972)

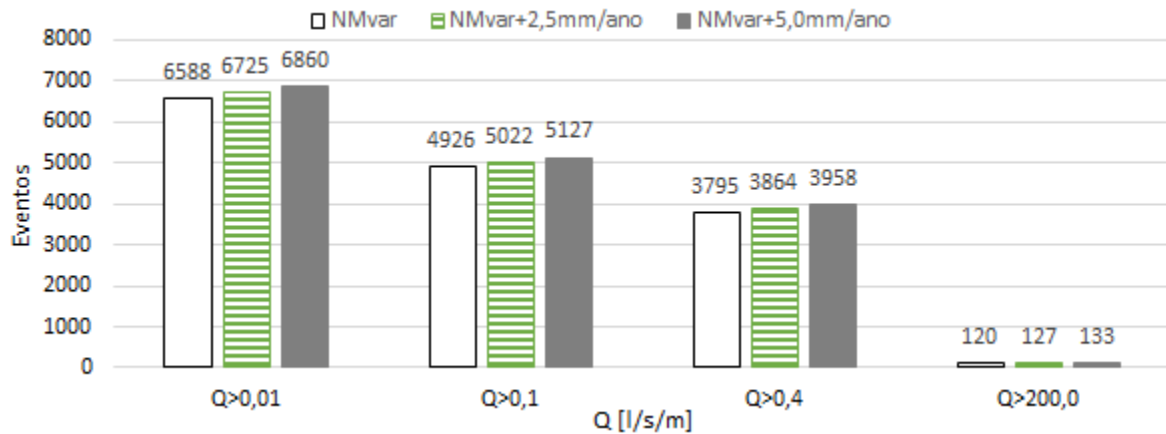


Figura 5.30-Número de eventos em que o Q ultrapassou os valores limite de segurança da estrutura em função dos respectivos aumentos do NM, 2,5mm/ano e 5,0mm/ano.

Apesar da Figura 5.30 ilustrar de forma clara o aumento do número de eventos com o aumento do NMM, é importante verificar de que forma esse aumento ocorreu ao longo dos anos para as várias gamas de Q. Assim, para um aumento de 2,5mm/ano, na gama $Q>0,01$ l/s/m verificou-se um aumento do número médio de eventos por ano de 2%, atingindo um máximo de 11% no ano de 1993; na gama $Q>0,1$ l/s/m verificou-se um aumento do número médio de eventos por ano de 2%, atingindo um máximo de 7% no ano de 2008; na gama $Q>0,4$ l/s/m verificou-se um aumento do número médio de eventos por ano de 2%, atingindo um máximo de 12,5% no ano de 2004; na gama $Q>200,0$ l/s/m as percentagens do aumento do número de eventos são pouco representativas, dada a baixa ocorrência de caudais tão elevados. Ainda assim é importante registar que em dois dos trinta e sete anos em que se verificaram caudais superiores a 200,0 l/s/m houve um aumento no número de eventos de 100%, ou seja, para NMvar nos anos de 1971 e 1981 obteve-se 1 evento em cada ano com $Q>200,0$ l/s/m, enquanto para NMvar+2,5mm/ano obtiveram-se 2 eventos em cada ano. Este aumento poderia ser irrelevante se se tratasse de baixos caudais, mas dados os elevados valores de Q, é um aumento importante de referir e ter em atenção. Para o aumento de 5,0mm/ano o aumento percentual de eventos por ano foi o dobro comparativamente ao aumento de 2,5mm/ano para as 3 gamas de caudais mais baixas, ($Q>0,01$ l/s/m, $Q>0,1$ l/s/m e $Q>0,4$ l/s/m) sendo que se verificou um aumento do número médio de eventos por ano de 4%. Para os caudais mais elevados, $Q>200,0$ l/s/m, passaram a 4 os anos em que se verificou um aumento de 100% no número de eventos para NMvar+5,0mm/ano comparativamente à análise para NMvar.

Na Tabela 5.17 são apresentados os valores máximos de Q, $Q_{\text{máx}}$, obtidos para NMvar e para NMM afetado pelos respetivos aumentos de 2,5mm/ano e 5,0mm/ano. Como seria de esperar o $Q_{\text{máx}}$, tal como o número de eventos, aumenta para ambos os casos de subida do NMM analisados, sendo o aumento de 1,8% para a subida do nível de mar de 2,5mm/ano e de 3,6% para a subida do nível de mar de 5,0mm/ano.

Tabela 5.17- Caudais máximos registados para NMvar, NMvar+2,5mm/ano e NMvar+5,0mm/ano e respetivas datas de ocorrência.

Q_{máx} (l/s/m)		
Data de ocorrência (dd/mm/aa)		
NMvar	NMvar+2,5mm	NMvar+5,0mm
1360,9	1385,3	1409,78
17/01/1973	17/01/1973	17/01/1973

6. CONCLUSÕES

Na presente dissertação o principal objetivo centrou-se em calcular o galgamento sobre uma estrutura de proteção marginal localizada na costa oeste portuguesa, mais concretamente na praia da Gala-Cova, tendo em consideração: i) condições de estado do mar (agitação marítima e nível do mar) de anos transatos, obtidas de dados de *hindcast*; e ii) condições de estado do mar afetadas pelas alterações climáticas, mais precisamente pela subida do nível médio do mar, com dois cenários possíveis, 2,5mm/ano e 5,0mm/ano.

Para além da análise do efeito da subida do nível médio do mar no galgamento da estrutura de proteção marginal, dada a elevada importância de outros fatores que condicionam a determinação deste fenómeno, analisou-se também: i) a influência de considerar a variabilidade do nível do mar constante ou variável, ii) a influência do local onde são medidos os dados de agitação marítima e iii) a influência da evolução do perfil transversal arenoso em frente à defesa aderente.

Os primeiros resultados obtidos são provenientes da análise dos dados de agitação marítima obtidos entre os anos de 1953 e 2009 no ponto de coordenadas 10°W e 40°N, a fim de verificar a existência de tendências evolutivas, valores médios, máximos e mínimos associados aos parâmetros de agitação Hs, Dir e Tp.

Para as condições gerais de agitação marítima, não se identificou um padrão evolutivo claro dos parâmetros de agitação quando comparados os valores mínimos com os valores máximos. No que se refere a Hs, é possível concluir que, após 1991, as oscilações entre os valores médios máximos e os valores médios mínimos aumentam. Já no que diz respeito aos valores máximos de Hs, as oscilações são uniformes no período 1953-2009. Através das linhas de tendência associadas ao respetivo desvio padrão de cada parâmetro de agitação, é possível concluir que apenas para Hs existe um aumento na variação dos seus valores médios refletido como já foi referido, pelas oscilações visíveis após 1991. Para a Dir e Tp as linhas de tendência apresentam um comportamento aproximadamente constante.

Para condições de temporal foi possível verificar um ligeiro aumento dos temporais no período 1953-2009, sendo que a duração de cada temporal variou entre os 0,25 e os 15,25 dias, predominando as durações entre os 0,25 e 1,5 dias.

Analisados os parâmetros de agitação marítima, passou-se à análise do galgamento sobre a estrutura de proteção marginal, avaliando quatro variáveis determinantes nomeadamente, a influência do NMM (constante, para condições de preia mar; e variável, devido à maré astronómica e meteorológica), a influência do local onde são obtidos os dados de agitação (-14 m ZH e -37 m ZH), a influência do perfil transversal (testado com base em levantamentos topo-hidrográficos de 1975, 1978 e 2011) e a influência da subida do nível do mar prevista consequente das alterações climáticas (subidas de +2.5 mm/ano e +5 mm/ano).

Relativamente à influência do NM foi possível constatar que, independentemente da profundidade a que foram obtidos os dados de agitação, o caudal médio galgado, Q , é nulo para mais de 80% dos eventos, e superior para um NMcte em mais de 90% dos 20% que se revelaram como não nulos. Este panorama verifica-se devido ao facto de apenas 5% dos 86200 dados e *hindcast* com NMvar apresentarem valores de NM superiores a 3,5m, valor definido para NMcte. De referir também que Q apresenta valores relevantes ($Q > 0,01$ l/s/m) para valores de $H_s > 3,0$ m e de T_p compreendidos no intervalo [11; 23] (s). As principais diferenças entre QNMcte e QNMvar apresentam-se na sua grande maioria (88%) para valores de $Q < 10,0$ l/s/m e estão associadas (em mais de 70%) a valores de QNMvar $< 0,4$ l/s/m. Relativamente ao número de eventos em que Q ultrapassou os valores limite de segurança da estrutura, estes apresentam-se superiores de uma forma constante no período 1952-2010 para um NMcte. Embora seja claro que para a situação de NMcte Q apresenta resultados do lado da segurança (majorados), optou-se por tomar como referência o NMvar na avaliação da influência dos restantes fatores pois é a condição mais realista e que reflete de forma mais precisa as condições a que a estrutura está sujeita.

Relativamente à profundidade a que são obtidos os dados de agitação, a análise foi feita para -14 m ZH e -37 m ZH. A grande diferença associada aos parâmetros de agitação entre as duas batimétricas está na Dir, pois à medida que a onda se propaga para menores profundidades, a Dir tem tendência a aproximar-se da perpendicular à linha de costa. Esta tendência é claramente comprovada para os resultados de $Q > 0,01$ l/s/m, que no caso dos dados de agitação marítima na batimétrica -14 m ZH estão associados a um intervalo de Dir mais estreito ([251,3;321,8] (°N)) do que na batimétrica -37 m ZH ([2185;331,9] (°N)). Verificou-se ainda que 73% dos dados relativos à batimétrica -14 m ZH e 64% dos dados relativos à batimétrica -37 m ZH, se inserem nos dois intervalos mais próximos do valor adotado na fórmula de Mase (289,6°N), o que valida e aumenta a garantia dos resultados obtidos se aproximarem da realidade a que a estrutura está sujeita. Relativamente ao Q para um NMvar alterando apenas o local onde são obtidos os dados de agitação não existiu uma superioridade clara associada a uma batimétrica específica, registando-se 56% dos eventos com $Q(-37 \text{ m ZH}) > Q(-14 \text{ m ZH})$ sendo que 70% das diferenças estão associadas a $Q < 1$ l/s/m.

Relativamente à influência do perfil transversal é possível concluir que, embora este tenha sofrido alterações na sua morfologia no período 1975-2011, essas alterações não se refletiram de forma clara em, exibindo diferenças inferiores a 1% no número de eventos em que Q ultrapassou os limites de segurança da estrutura.

Por fim, verificada a influência da subida do nível médio do mar, consequente das alterações climáticas, para um aumento de 2,5mm/ano e 5,0mm/ano em relação ao nível de referência, concluiu-se que: para diferenças entre Q para o nível de referência e Q para as respetivas subidas do NMM superiores a 100%, $\Delta Q > 100\%$, as mesmas não se revelaram preocupantes no que ao impacto sobre a estrutura dizem respeito pois apenas afetam $Q < 0,01$ l/s/m tanto para uma subida do NMM de 2,5mm/ano, como para uma subida do NMM de 5,0mm/ano; para $\Delta Q > 50\%$ e uma subida do nível do mar de 2,5mm/ano

foi possível concluir o mesmo que se concluiu para $\Delta Q > 100\%$, já para uma subida do nível do mar de 5,0mm/ano foi possível verificar a existência de 554 eventos com Q máximo inferior a 0,4 l/s/m mas que, ainda assim, apresentam valores superiores ao limites de segurança da estrutura à circulação de veículos e pessoas; as $\Delta Q > 20\%$ revelaram-se as mais preocupantes e importantes pois estão afetadas a valores de Q que estão acima dos limites de segurança da estrutura não só relativamente à circulação de veículos e pessoas, mas também colocam em risco propriedades no tardo da estrutura, sendo o Q máximo para este caso 53,5 l/s/m.

Concluiu-se ainda que a subida do NMM tem uma influência clara no aumento do número de eventos em que Q ultrapassa os valores limite de segurança da estrutura, registando-se aumentos anuais no número de eventos, na ordem dos 2% para uma subida do NMM de 2,5mm/ano, e na ordem dos 4% para uma subida do NMM de 5,0mm/ano. De referir que os respetivos aumentos se deram de uma forma linear, algo importante de assinalar tendo em conta a complexidade do fenómeno do galgamento, e todas as variáveis que o condicionam.

Seria interessante, como futuro trabalho do presente estudo realizado, uma análise aprofundada das características da estrutura de proteção, desde os seus materiais à sua geometria, a alterar para mitigar os efeitos das alterações climáticas. Como foi referido, na secção 2.1.2, a geometria da estrutura é uma das variáveis condicionantes para o galgamento, e a única sobre a qual o homem tem controlo, no sentido de ser melhorada e adaptada às condições de agitação e nível do mar obtidas de dados de anos transatos, mas também de previsões futuras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. D. Andrade, César; Freitas, Maria da Conceição; Santos, “Sector de Zonas Costeiras,” in *Estratégia Nacional de Adaptação aos Impactos das Alterações Climáticas Relacionadas com os Recursos Hídricos*, Agência Portuguesa do Ambiente, Ed. Agência Portuguesa do Ambiente, 2008, p. 14.
- [2] L. Afonso, “Estudo Numérico do Galgamento de Estruturas de Protecção Costeira,” Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias- Universidade Nova de Lisboa, 2011, p. 91.
- [3] B. . Van der Meer, J.W.; Allsop, N.W.H.; Bruce, T.; De Rouck, J.; Kortenhaus, A.; Pullen, T.; Schüttrumpf, H.; Troch, P.; Zanuttigh, “EurOtop Manual on wave overtopping of sea,” 2nd ed., Van der Meer Consulting, Ed. 2007, p. 264.
- [4] J. A. Battjes, “Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves,” no. 74/2, Communications on Hydraulics, Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 1974, p. 251.
- [5] USACE, “Fundamentals of Design,” in *Coastal Engineering Manual, Part VI*, U.S. Army Corps of Engineers, Ed. U.S. Army Corps of Engineers, 2011, p. 378.
- [6] Y. Goda and Y. Kishira, “Laboratory investigation on the overtopping rates of seawalls by irregular waves,” vol. 14, no. 4, Port and Harbour Research Institute, 1975, p. 39.
- [7] T. Tamada, M. Inoue, and T. Tezuka, “Diagrams for the estimation of wave overtopping rate on gentle slope-type seawalls,” in *Proceedings of Coastal Engineering*, vol. 49, JSCE, Ed. JSCE, 2002, pp. 641–645.
- [8] Y. Goda, “Derivation of unified wave overtopping formulas for seawalls with smooth, impermeable surfaces based on selected CLASH datasets,” in *Coastal Engineering*, vol. 56, Elsevier, Ed. Elsevier Science, 2009, pp. 385–399.
- [9] H. Mase, T. Tamada, T. Yasuda, T. S. Hedges, and M. T. Reis, “Wave Runup and Overtopping at Seawalls Built on Land and in Very Shallow Water,” in *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, vol. 139, no. October, 2013, pp. 346–357.
- [10] E. M. Coeveld, M. R. a Van Gent, and B. Pozueta, “Manual neural network: NN_Overtopping 2,” in *CLASH WP8--Rep., WL Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands*, 2005, p. 38.
- [11] Câmara Municipal da Figueira da Foz, “Tendências demográficas no município da figueira da

foz,” 2005, p. 149.

- [12] P. P. Cunha and J. Dinis, “A erosão nas praias do Cabo Mondego à Figueira da Foz (Portugal centro-oeste), de 1995 a 1998,” in *Territorium*, vol. 5, 1998, pp. 31–50.
- [13] F. Oliveira and F. Brito, “Evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do Rio Mondego, de 1975 a 2011,” in *VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, 2015, pp. 1–15.
- [14] G. Dodet, X. Bertin, and R. Taborda, “Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades,” in *Ocean Modelling*, vol. 31, Elsevier, 2010, pp. 120–131.
- [15] A. B. Fortunato and M. Rodrigues, “Modelação da inundação costeira na ria de aveiro,” in *11  Congresso da água*, 2011, pp. 1–15.
- [16] E. T. Mendoza, J. A. Jimenez, and J. Mateo, “A coastal storms intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean),” in *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 11, Copernicus Publications, 2011, pp. 2453–2462.
- [17] V. Laface and C. G. Soares, “Directional analysis of sea storms,” in *Ocean Engineering*, vol. 107, 2015, pp. 45–53.